

DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA COMPUERTA DE BISAGRA INFERIOR PARA UN DIQUE SECO



Sergio Concepción Sánchez
Ingeniería Técnica Naval (SPB) 2011
Tutor: Daniel Yebra Folgueral

Índice

| | |
|--|---------|
| ❖ Introducción | Pág. 5 |
| ❖ Estudio básico de las compuertas | Pág. 7 |
| ▪ Compuerta | Pág. 7 |
| ▪ Apoyos y bisagras | Pág. 7 |
| ▪ Elementos de estanqueidad | Pág. 8 |
| ▪ Elementos de elevación | Pág. 8 |
| ▪ Compuerta flotante | Pág. 9 |
| ▪ Compuerta de bisagra lateral | Pág. 9 |
| ▪ Compuerta de bisagra inferior | Pág. 10 |
| ▪ Análisis hidrostático | Pág. 11 |
| ▪ Análisis del pandeo | Pág. 13 |
| ▪ Resistencia de materiales | Pág. 14 |
| ▪ Análisis de mareas y olas | Pág. 16 |
| ❖ Situación y diseño básico del dique | Pág. 17 |
| ▪ Situación | Pág. 17 |
| ▪ Eslora | Pág. 19 |
| ▪ Manga | Pág. 20 |
| ▪ Calado | Pág. 21 |
| ❖ Estudio de la apertura y cierre de la compuerta | Pág. 23 |
| ▪ Cálculo de la presión en la compuerta | Pág. 23 |
| ▪ Cálculo de pesos | Pág. 24 |
| ▪ Cálculo compuerta cerrada con agua en su exterior | Pág. 25 |
| ▪ Cálculo apertura compuerta | Pág. 26 |
| ▪ Influencia de la posición del eje en el comportamiento de la compuerta | Pág. 27 |
| ❖ Diseño y cálculo de la compuerta | Pág. 29 |
| ▪ Sección con apoyo a 4,5 m respecto al fondo del dique | Pág. 30 |
| ▪ Sección con apoyo situado en el extremo del dique | Pág. 34 |
| ▪ Análisis compuerta completamente abierta | Pág. 38 |
| ▪ Diseño de la estructura interna de la compuerta | Pág. 42 |
| ❖ Cálculo por elementos finitos | Pág. 45 |
| ▪ Diseño de la geometría | Pág. 45 |

| | | |
|---|--|----------|
| ▪ | Propiedades de la geometría | Pág. 47 |
| ▪ | Condiciones de contorno | Pág. 48 |
| ▪ | Acciones aplicadas | Pág. 50 |
| ▪ | Resultados obtenidos | Pág. 51 |
| ♦ | Desplazamientos | Pág. 52 |
| ♦ | Tensiones cortantes | Pág. 54 |
| ♦ | Momentos flectores | Pág. 57 |
| ♦ | Esfuerzo normal máximo | Pág. 59 |
| ♦ | Momento flector máximo | Pág. 61 |
| ❖ | Diseño y cálculo de los elementos de apoyo y elevación de la compuerta | Pág. 64 |
| ▪ | Apoyos internos | Pág. 64 |
| ♦ | Elemento de apoyo | Pág. 65 |
| ♦ | Pasador | Pág. 67 |
| ♦ | Cojinetes | Pág. 69 |
| ▪ | Apoyos inferiores | Pág. 71 |
| ♦ | Apoyos del dique | Pág. 72 |
| ♦ | Apoyos de la compuerta | Pág. 73 |
| ♦ | Pasador y cojinete | Pág. 74 |
| ▪ | Medios de elevación | Pág. 76 |
| ❖ | Diseño de la junta de estanqueidad | Pág. 83 |
| ▪ | Tipología de junta | Pág. 83 |
| ▪ | Geometría de la junta | Pág. 84 |
| ▪ | Material de la junta | Pág. 86 |
| ▪ | Anclaje de la junta | Pág. 87 |
| ❖ | Estudio constructivo de la compuerta | Pág. 88 |
| ▪ | Compuerta | Pág. 88 |
| ▪ | Soportes | Pág. 92 |
| ▪ | Pasadores | Pág. 94 |
| ▪ | Cojinetes | Pág. 94 |
| ▪ | Procedimiento de construcción | Pág. 95 |
| ❖ | Mantenimiento de la compuerta | Pág. 98 |
| ❖ | Estudio medioambiental | Pág. 102 |
| ▪ | Necesidad de un estudio medioambiental | Pág. 102 |
| ▪ | Estudio medioambiental de la implantación del dique en la ampliación del puerto de Barcelona | Pág. 102 |
| ▪ | Impacto medioambiental en la construcción e instalación de la compuerta | Pág. 104 |

| | |
|---|----------|
| ▪ Impacto medioambiental de la operación del dique | Pág.106 |
| ▪ Impacto medioambiental en la retirada de la compuerta | Pág. 108 |
| ❖ Conclusiones | Pág. 110 |
| ❖ Índice de imágenes | Pág. 114 |
| ❖ Anexos: | Pág. 117 |
| ❖ Bibliografía: | Pág. 133 |
| ❖ Planos | Pág. 135 |

Introducción

Según la Real Academia Española de la Lengua, se define compuerta como: plancha fuerte de madera o de hierro, que se desliza por carriles o correderas, y se coloca en los canales, diques, etc., para graduar o cortar el paso del agua.

El uso de las compuertas no es una invención moderna, sino que tiene sus orígenes hace más de un milenio. Ya en la antigua china, se usaban sistemas para almacenar agua en distintos puntos de un río para luego poder liberarla de una forma continua según los requisitos de las comunidades. También se han descubierto vestigios de compuertas primitivas hechas en canales de piedra por las antiguas culturas precolombinas en América del sur y centro-América.

Más tarde este sistema fue trasladado a distintas regiones de todo el mundo, adaptándolo a los requisitos de cada comunidad. Un ejemplo importante, es el sistema de compuertas y canales situado en Holanda. Debido a su orografía, gran parte del país está situado por debajo del nivel del mar y es por ello, que habitualmente sufría graves inundaciones; a través del diseño de canales y compuertas se ingenió un modo de ir extrayendo el agua de las zonas que se encontraban por debajo del nivel del mar para poder convertirlas en áreas de cultivo.

Pero de la misma forma que una compuerta permite que el agua que fluye por un determinado río o canal se mantenga estancada, una compuerta puede ser utilizada para que un determinado emplazamiento no sea inundado por el agua, tal y como sucedería en el caso de que no existieran las compuertas.

Pero, para comprender como se introdujeron las compuertas en el mundo de la construcción naval es importante hacer una visión general de la evolución de esta a lo largo de los últimos siglos. En 1492, con la construcción de la Santa María, La Pinta y La Niña; se produjo un incremento en el tamaño de las embarcaciones. Poco a poco los tamaños de los buques, tanto militares como de carga, se fue incrementando; más tarde con la introducción del vapor ,en 1807, y de los cascos metálicos ,en 1820, se empezaron a detectar ciertos problemas con los métodos tradicionales de las botaduras de los buques.

Ya existían diques secos artesanales en la época greco-romana y hay escritos chinos de 1088 d.C. que hacen referencia a la utilización de diques secos para la construcción de barcos. Pero no es hasta mediados del siglo XVI, cuándo el rey de Inglaterra mandó construir una gran flota, se construyó un dique seco en HMNB Portsmouth; una de las bases de su majestad. Las compuertas eran de madera, y cada vez que se inundaba el dique se debía construir otra compuerta de madera ya que la anterior quedaba inoperativa al desmontarla para dejar salir al buque del dique.

A partir de mediados del siglo XIX con el incremento de la flota naval, este tipo de diques se fueron haciendo cada vez más importantes. Con la evolución tecnológica se crearon diques cuyas compuertas no se debían desmontar con cada botadura, y esto, permitía una gran versatilidad y una disminución en los tiempos de drenado y preparación del dique para una

nueva obra. A principios de siglo XX este tipo de diques se tomó como la forma más fiable y rentable a medio y largo plazo para la construcción de buques.

Pero no fue hasta el estallido de la 1ª, y posteriormente, la 2ª guerra mundial donde dichos diques se hicieron fuertes en el mercado naval mundial. En el estado español no se empezaron a construir los grandes diques secos hasta principio de siglo XX; uno de estos fue el dique seco de Cádiz el cual tiene una envergadura de 245m de largo, 38 de manga y 10,50 de altura útil.

El problema que afecta a los diques de botaduras tradicionales con rampas, es que si los buques pasan de una cierta eslora y la inclinación de la rampa no es lo suficientemente grande pueden producirse graves tensiones por flexión e incluso dañar alguna parte de la estructura del buque. Otro grave problema que plantea este método de construcción, es que para buques de un desplazamiento elevado su puesta en seco es prácticamente imposible, ya que se necesita una gran maquinaria para su elevación desde el agua.

Es por ello que en el contexto socio-económico de principios de siglo la alternativa de los diques secos de compuerta fue el método más utilizado por su economía y versatilidad; y actualmente sigue siéndolo.

En este trabajo se va a realizar un estudio sobre el cálculo y diseño de una compuerta de bisagra inferior para un dique seco. Se va hacer una visión general sobre como es una compuerta de un dique seco, los elementos que la componen y las diferentes teorías científico-técnicas que se deben tener en cuenta a la hora del diseño de la misma. Posteriormente se hará un estudio sobre cuál debería ser el emplazamiento idóneo para el dique y cuáles deberían de ser sus dimensiones en función del tráfico marítimo al cual esté destinado.

Una vez obtenidos los datos principales del dique se realizará un anteproyecto evaluando como deberá de ser la geometría del dique, su funcionamiento y su diseño preliminar en función de los elementos de elevación y apoyos que se determinen. A continuación se realizará el cálculo y diseño de cada uno de los elementos que componen la compuerta y la geometría que deberá tener la entrada del dique y el asiento de la compuerta. Cabe destacar que no se realizará ningún cálculo estructural sobre la estructura de hormigón armado del dique y solo se considerara su geometría.

Posteriormente se realizará un estudio económico del coste de construcción de la compuerta y su instalación; así mismo se realizara un estudio de impacto medioambiental del propio dique en su operativa habitual.

Por último se obtendrán una conclusión donde se pondrán de manifiesto los datos obtenidos en cada uno de los apartados trabajados y se valorará la viabilidad del proyecto.

Estudio básico de las compuertas

Una compuerta es un elemento situado en un canal, conducto, presa o dique, que permite regular el flujo de fluido que por él circula. Existe una gran variedad de compuertas según la utilidad a la que esté destinada. En el caso de compuertas para diques secos, la mayoría tienen una serie de elementos comunes.

COMPUERTA:

Es el elemento principal del conjunto, su misión es la de impedir el paso de la masa principal de agua hacia el interior del dique seco. Su construcción se basa en una serie de planchas metálicas soldadas formando un cajón, en cuyo interior hay una serie de refuerzos que dan rigidez al conjunto. Lo usual es que en la parte superior, dicho cajón sea ligeramente más estrecho que en la parte inferior, ya que debido a la columna de agua en las zonas más profundas existe una mayor presión.

Los refuerzos de la estructura pueden ser de dos tipos según la construcción.

- Perfiles normalizados: Son elementos estructurales normalizados cuyas características están tabuladas. Este tipo de perfiles es muy utilizado ya que debido a su amplia gama, se puede adaptar a una gran variedad de situaciones y estructuras.
- Refuerzos propios: Hay ciertos casos en que los elementos de refuerzos normalizados no son útiles o no satisfacen todas las necesidades del proyecto. En estos casos, se recurre al diseño y construcción de elementos propios para dicha estructura.

El material de construcción tanto de las planchas como de los elementos de refuerzo es acero. Este puede variar según las necesidades de cada compuerta. Debido a que el ambiente del agua salada es corrosivo, se suele realizar un tratamiento superficial a los forros exteriores de la compuerta para evitar su deterioro con el tiempo. El tratamiento suele ser la aplicación de pintura epóxica, la cual no solo protege de los elementos corrosivos, sino también de otros agentes adversos superficiales.

APOYOS Y BISAGRAS:

Los apoyos son los elementos sobre los cuales la compuerta descansa cuando se encuentra totalmente abierta o totalmente cerrada. Suelen ser superficies totalmente lisas y suficientemente rígidas para no deformarse con el peso de la propia estructura en las condiciones operativas impuestas. Es por ello, que el material de dichos elementos acostumbra ser hormigón armado.

Las bisagras son elementos que ayudan al movimiento articular de las compuertas que están diseñadas para girar respecto de un eje; este elemento no existe en compuertas flotantes. Su diseño suele basarse en unos cojinetes situados tanto en la compuerta como en la zona de apoyo del dique, los cuales están unidos a través de unos pasadores de acero macizo. Por la

complejidad de dicho elemento los materiales suelen ser variados, pero predomina principalmente el acero estructural en sus diversas composiciones.

ELEMENTOS DE ESTANQUEIDAD:

Los elementos de estanqueidad, son los encargados de generar un sello lo más estanco posible entre la compuerta y la entrada del dique seco. Ya se ha comentado que la compuerta es la encargada de soportar la masa de agua principal; y estos elementos, se emplean para evitar las pequeñas fugas que puedan acontecer. Su diseño puede ser de múltiples geometrías en función de las necesidades, pero como condición principal debe estar situado por todo el perímetro de contacto entre la compuerta y la entrada del dique. El material suele ser un elastómero, el más usual es la goma de caucho, gracias a su gran resistencia a los agentes atmosféricos y a la presión.

ELEMENTOS DE ELEVACIÓN:

Los elementos de elevación son los sistemas destinados al desplazamiento de la compuerta según las necesidades del astillero. Estos sistemas pueden ser muy variados según la tipología de la compuerta, pero los más usuales son los siguientes:

- Sistema por empuje hidrodinámico: la compuerta se utiliza como un cajón completamente estanco, con el que se controla su elevación en función de la relación agua/aire que se introduce en su interior.
- Sistema por pistones hidráulicos: el movimiento de la compuerta viene dado por una serie de pistones situados en puntos de la compuerta y unidos con el propio dique por el extremo opuesto.
- Sistema de cadenas: La elevación de la compuerta se realiza mediante el uso de cadenas ancladas en los laterales de la compuerta que se mueven mediante unos sistemas situados en los laterales del dique seco.

Como ya se ha mencionado, al igual que existen una variedad de diques secos, también existen una gama de compuertas que se pueden instalar en éstos. La decisión de que compuerta elegir en cada uno de los casos y el sistema que se va a utilizar para su funcionamiento; es un criterio propio que deberá decidir el proyectista y que en muchos casos influirá de forma determinante en la viabilidad o no del proyecto.

En la construcción de compuertas de diques secos no se suelen generar grandes innovaciones y existen básicamente 3 modelos de compuertas las cuales pueden variar su método de elevación según sus características constructivas.

Las tipologías de compuertas más frecuentes son las siguientes:

COMPUERTA FLOTANTE:

Las compuertas flotantes son utilizadas para los grandes diques secos ya que la utilización de compuertas ancladas al propio dique suelen generar problemas de esfuerzo excesivo en las bisagras debido a que han de soportar unas tensiones cortantes elevadas.

Una compuerta flotante se puede definir como un cajón metálico completamente estanco, al cual se le puede introducir o extraer agua de su interior para poder hundirlo o elevarlo en los apoyos del dique. Para mover la compuerta de su posición normal a una posición que permita la entrada y salida de buques al dique se utilizan remolcadores que arrastran a la misma.

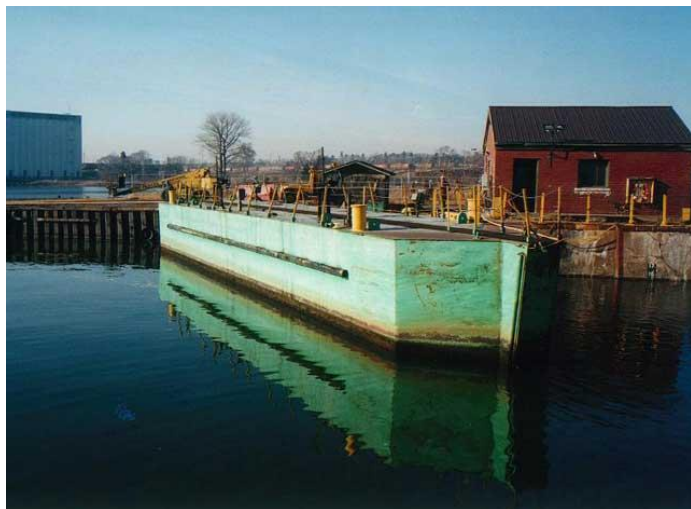
La maniobra de funcionamiento de la compuerta es la siguiente:

- 1- La compuerta situada en un lateral se deslaza hasta un calado adecuado y mediante los remolcadores se sitúa en la posición adecuada.
- 2- Se deslaza la compuerta mientras los remolcadores hacen presión contra el dique.
- 3- Se extrae el agua del interior manteniendo la presión de los remolcadores.
- 4- Cuando la diferencia de niveles es suficiente para que la presión exterior mantenga la posición de la compuerta no es necesario la presión de los remolcadores y estos se retiran.

Para la retirada de la compuerta se realiza la secuencia anterior en sentido inverso.

Un requisito importante a la hora de diseñar este tipo de compuerta, es el cálculo de estabilidad del cajón. Se ha de tener en cuenta la geometría del cajón, el peso del mismo y el volumen que se desplaza; a partir de estos datos se evalúa cual debe ser el peso de lastre mínimo que se ha de disponer para que el conjunto sea estable, aunque sufra una cierta escora. Lo usual en estos casos es

usar pesos muertos de cemento, ya que tienen una densidad elevada y pueden adaptarse a la geometría que se necesite.



Compuerta flotante

COMPUERTA DE BISAGRA LATERAL:

Las compuertas de bisagra lateral, como su propio nombre indica, tienen como característica fundamental que el movimiento viene dado por una bisagra situada en uno de sus laterales. Como ya se ha comentado, si la compuerta es excesivamente grande aparece un fenómeno de

flexión que provoca elevadas tensiones. Cuando es preciso utilizar este tipo de compuertas en diques de mangas elevadas, se realiza un proyecto con dos compuertas de bisagra situadas a cada banda del dique, que al cerrarse forman un cierto ángulo que permite aguantar la presión del agua.

El funcionamiento de dicha compuerta es bastante sencillo, debido a que no se necesita de sistemas u equipos suplementarios para el manejo de la misma. El problema que conlleva esto es que hay que disponer de un sistema propio para la apertura y cierre de la misma. Usualmente se usan pistones hidráulicos o sistemas de cables y cadenas, ambos métodos permiten una rápida maniobra de la misma.

La maniobra de funcionamiento de la compuerta es la siguiente:

- 1- Una vez el buque está dentro del dique, se accionan los mecanismos de cierre de la compuerta y esta va pivotando en sus bisagras hasta llegar a hacer contacto con el dique seco.
- 2- Una vez la compuerta está en contacto se empieza a deslazar el dique manteniendo una cierta presión en la puerta.
- 3- Una vez la presión exterior es capaz de mantener el dique estanco se deja de ejercer presión.

Este tipo de compuertas es muy utilizado en diques donde se necesita una operación rápida de la misma, o en el caso de que la doble compuerta donde la manga del dique sea excesiva para otro tipo de compuerta. Otra ventaja de este tipo de compuertas es que un solo operario puede realizar toda la maniobra lo que reduce el riesgo de equivocaciones o descoordinación entre el personal que puede llegar a convertirse en accidentes.



Compuerta de bisagra lateral

La desventaja principal es el esfuerzo que soportan las bisagras, que necesitaran un cálculo muy preciso para no sufrir daños posteriores.

COMPUERTA DE BISAGRA INFERIOR:

Las compuertas de bisagra inferior son aquellas que se mueven respecto de un eje situado horizontal y perpendicularmente a la eslora del dique seco. Suelen estar formadas por una sola

compuerta que abarca toda la manga del dique y que permite con solo una maniobra, abrir o cerrar el dique según se precise.

Dicho tipo de compuerta se suele utilizar en diques cuyos calados no son excesivamente elevados, ya que debido a su funcionamiento, si la compuerta tiene mucha altura se produce un esfuerzo excesivo en la bisagra. Como sucedía con la compuerta anterior, no es preciso la utilización de medios externos para la apertura y cierre de la misma, si no que dispone de medios propios.

Cuando se utilizan pistones para la manipulación de la compuerta es preciso tener en cuenta una gran variedad de aspectos que pueden influir de forma notoria en el funcionamiento de esta, como, por ejemplo, si los pistones estarán sumergidos o por el contrario están en un compartimiento estanco, los conductos hidráulicos



Compuerta de bisagra inferior

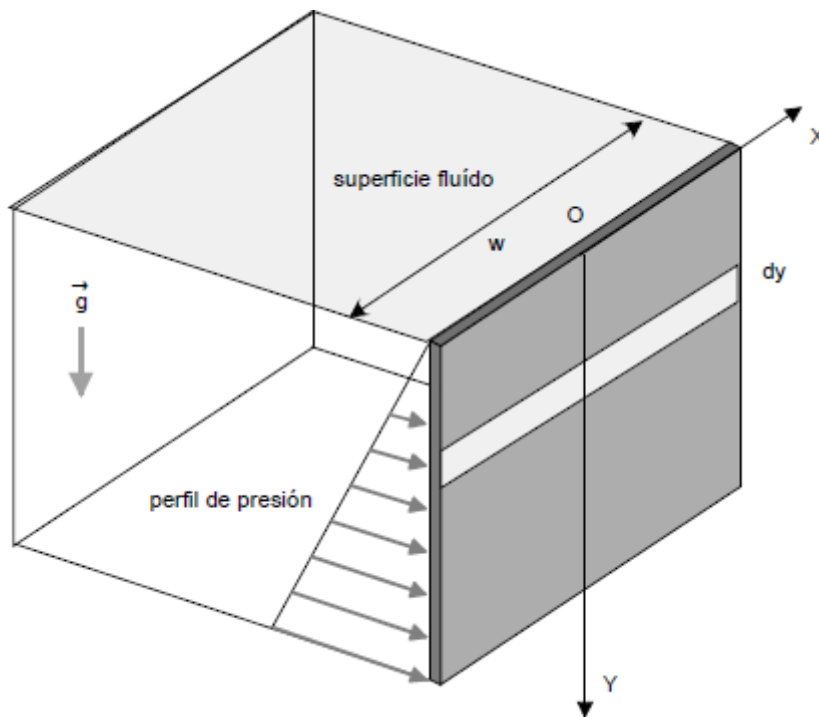
entre pistones y las bombas, etc.

La maniobra de funcionamiento es prácticamente la misma que la utilizada en las compuertas de bisagra lateral, la única diferencia es que en este caso la compuerta pivota sobre su bisagra horizontal. Se puede decir que esta tipología de compuerta es de las más rápidas de manipulación, es por ello que es de las más utilizadas tanto en diques secos como en elevadores de buques.

A la hora de diseñar cualquier estructura se deben tener en cuenta una serie de teorías y fundamentos científico-técnicos los cuales harán que nuestro proyecto se comporte de la forma prevista. En el cálculo de una compuerta además de las teorías de cálculo de estructura clásica se deben tener en cuenta otra clase de estudios. Algunos de los fundamentos teóricos más importantes son los siguientes:

Análisis hidrostático:

La hidrostática es el estudio sobre los fluidos que permanecen en un estado de reposo o con una velocidad aparentemente nula. Las fuerzas horizontales causadas sobre superficies por la presión de un líquido, aumentan linealmente con la profundidad, de modo que se tienen fuerzas distribuidas no uniformemente actuando sobre ellas. Según el análisis clásico de la estática la resultante de ese sistema será una fuerza paralela aplicada sobre un punto arbitrario, mas el momento de todas esas fuerzas distribuidas respecto a ese mismo punto.



Esquema de la presión hidrostática en una plancha vertical

Para dicho análisis no se tendrá en cuenta la presión atmosférica ya que actúa en ambas caras de la compuerta. Si definimos la fuerza neta que actúa sobre una cierta profundidad y y sobre el elemento de área de ancho w y altura dy :

$$dF = p w dy = \rho g y w dy$$

$$\frac{dF}{dy} = \rho g y w$$

Por lo tanto el cálculo de la fuerza resultante dependerá de la forma de la superficie que se considere. Si lo evaluamos para una superficie rectangular situada a una cierta profundidad el análisis del sistema será el siguiente:

En este caso se va evaluar la fuerza resultante de las fuerzas distribuidas entre los puntos y_1 e y_2 ; la fuerza resultante vendrá dada por el cálculo correspondiente a las fuerzas generadas y el punto de aplicación será el centroide de la figura correspondiente.

Como ya se sabe el área del perfil de presión es:

$$\frac{1}{2}(a + b)(y_2 - y_1)$$

El centroide de dicha área (calculado de y_1 hacia abajo)

$$\frac{1}{3} \frac{(a + 2b)}{(a + b)} (y_2 - y_1)$$

donde a y b son fuerzas por unidad de longitud:

$$a = \rho g w y_1$$

$$b = \rho g w y_2$$

La fuerza resultante del sistema será:

$$F = \frac{1}{2} (\rho g w y_1 + \rho g w y_2) (y_2 - y_1)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho g w (y_2^2 - y_1^2)$$

Y su punto de aplicación será:

$$Y_p = y_1 + \frac{1}{3} \frac{(a + 2b)}{(a + b)} (y_2 - y_1)$$

$$Y_p = \frac{2 y_1^2 + y_2 y_1 + y_2^2}{3 (y_1 + y_2)}$$

Análisis del pandeo:

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión.

Las compuertas de los diques secos pueden tener alturas próximas a los 10 m, esto puede ocasionar que aparezcan esta clase de fenómenos y provocar graves esfuerzos en la estructura que pueden llegar al colapso de la misma.

Existen dos tipos de pandeos principales que se tienen en cuenta cuando una estructura puede presentar fenómenos de pandeo:

- Pandeo flexional: Es un efecto que puede aparecer en pilares muy esbeltos o de mediana esbeltez. Pueden aparecer dos clases de efectos:

- Pandeo local: aparecen en elementos aislados o que estructuralmente pueden parecer aislados. La carga crítica que pueden soportar viene definida por a formula de Euler, la cual depende de la longitud de la pieza, del material, de su sección transversal y de las condiciones de sujeción en los extremos.

$$P_{crit} = \pi^2 \frac{E I_{min}}{L^2} = \pi^2 \frac{EA}{\lambda^2}$$

Siendo P_{crit} , la carga crítica; E , Módulo de Young del material; I_{min} , momento de inercia mínimos de la sección transversal; L , longitud de la barra y λ la esbeltez mecánica de la pieza.

- Pandeo global: en una estructura formada por barras y otros elementos enlazados en los que pueden aparecer modos de deformación en los que los desplazamientos no sean proporcionales a las caras y la estructura puede pandear globalmente sin que ninguna de las barras alcance su propia carga de pandeo.

Resistencia de materiales:

Existe una gran variedad de análisis aplicables a la resistencia de los materiales, en este trabajo se va a trabajar con la teoría clásica del comportamiento tensión-deformación de los materiales en concreto de los metales que se van a utilizar. Para ello es necesario conocer qué tipo de información nos facilita esta clase de gráficos y cual de esta información nos es de utilidad a nosotros.

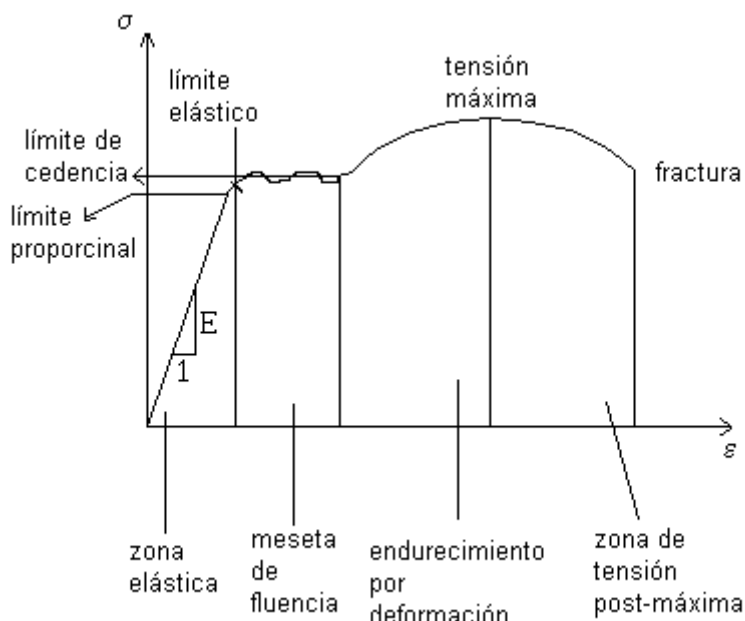


Diagrama tensión/deformación

Zona elástica: Cuando el material se encuentra trabajando en esta zona, las deformaciones que pueda sufrir desaparecen cuando el material deja de recibir cargas y vuelve a su estado de

reposo. Es en la zona que nos interesa trabajar, ya que nosotros no deseamos que nuestra estructura sufra variaciones permanentes en su geometría.

Meseta de fluencia: Es la zona donde el material comienza a comportarse plásticamente al aplicarle un cierto valor de tensiones. Si un material esta trabajando en esta zona al dejar de aplicarle las fuerzas éste no volverá a recuperar sus dimensiones originales y su curva tensión-deformación sufrirá un cambio en sus valores.

Endurecimiento por deformación: En esta región el material se comporta plásticamente pero a diferencia de la anterior puede soportar un aumento de la tensión aplicada. El punto donde si aplicamos una mayor tensión el material se quebraría se denomina punto de tensión máxima.

Zona de tensión post-máxima: En esta zona el material se encuentra en su región más critica ya que está muy próximo a su punto de fractura. El punto de fractura es el valor máximo permisible de deformación a partir del cual si se le aplica una tensión el material se fracturara.

Las regiones de trabajo de cada material así como sus puntos característicos son conocidos para la mayoría de los materiales empleados a nivel industrial; y son obtenidos a través de probetas mediante el uso de ensayos de tracción.

Como ya se ha comentado en el estudio estructural que nosotros queremos realizar solo nos interesa trabajar en la zona elástica del material. Otro punto que cabe destacar es que solo trabajaremos con materiales isótropos, es decir que tienen las mismas características mecánicas en todas las direcciones. A continuación se presentan una serie de ecuaciones representativas de nuestro estudio.

- **Materiales isótropos lineales:** Son aquellos donde el modulo de Young se presenta como un valor constante.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Donde: E es el módulo de elasticidad longitudinal.
 σ es la tensión ejercida sobre el área de sección transversal al objeto.
 ϵ es la deformación unitaria en cualquier punto de la barra.

- **Materiales isótropos no lineales:** son aquellos en que el tramo elástico del material no se comporta linealmente si no que viene dado por otro tipo de funciones, en dicho caso la ecuación genérica es la siguiente:

$$E_{sec} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$$

Donde: E_{sec} es el modulo de elasticidad secante.
 $\Delta \sigma$ es la variación de la tensión aplicada.
 $\Delta \epsilon$ es la variación de la deformación unitaria.

Existen otra serie de parámetros definitorios en la resistencia de materiales como son:

- Módulo de compresibilidad.
- Primer parámetro de Lamé.
- Módulo de cizalladura.
- Coeficiente de Poisson.

Análisis de mareas y olas:

El estudio de las mareas es un fenómeno que se ha estado estudiando desde hace cientos de años; actualmente este suceso es ampliamente conocido, incluso hasta el punto en que se pueden prever las subidas normales de las mareas de cualquier día del año utilizando una serie de tabulaciones de los distintos parámetros que influyen en ésta. Es por ello que no se va hacer un estudio de la variación de las mareas sino que se buscaran unos valores aproximados de los distintos calados provocados por las mareas y se escogerá el factor más desfavorable para realizar los cálculos.

El análisis del comportamiento de las olas es un estudio muy complejo de mecánica de fluidos el cual requiere una dedicación de tiempo y recursos muy importante. En el caso de los diques secos, las olas que puedan afectar a dicho sistema suelen ser de una altura no superior a 1,5 metros, ya que suelen estar resguardados del mar abierto. Es por ello que aunque la fuerza que pueda aplicarse debido al impacto de las olas tiene un cierto valor, para dicho estudio se consideraran despreciables y se tomará como parámetro que nos encontramos en aguas tranquilas.

Situación y diseño básico del dique

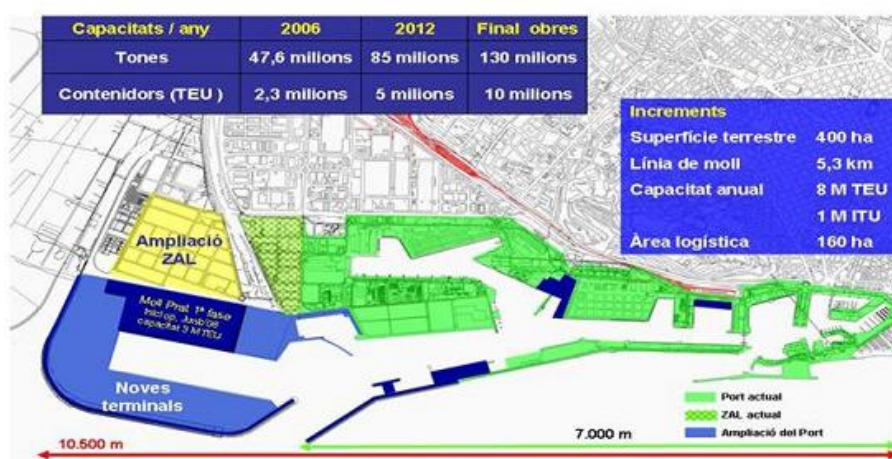
Situación:

A la hora de definir el emplazamiento apropiado para la construcción de un dique seco, se deben tener una gran cantidad de aspectos presentes. Los diques están incluidos en un tipo de industria la cual necesita un gran volumen de materiales, energía y de conexiones de transporte que le permitan realizar sus operaciones con la mayor eficiencia posible.

Para este proyecto se ha escogido la ciudad de Barcelona para la situación del dique, para tomar esta decisión se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- **Expansión del puerto:** La expansión comercial del puerto durante las últimas décadas es un aspecto muy importante en la economía global de la ciudad de Barcelona. Debido a este incremento de actividad, el puerto ha sufrido diversas ampliaciones a finales de siglo XX; pero se llegó a un momento en que el puerto de Barcelona ya no podía ampliarse más ya que estaba en el límite con el río Llobregat. Es por ello que se idea un plan estratégico con el que se desvió varios kilómetros la desembocadura del río y de esta forma ganar una gran superficie destinada a actividades portuarias. La ampliación del puerto ha consistido en ganar terreno al mar y construir en el las nuevas terminales y alargar el dique de abrigo existente en la zona sud del puerto. Se pretende aumentar la superficie en 400ha y las líneas de muelle en 5,3 km, esto permitirá aumentar la capacidad anual de contenedores en 8 millones.

L'AMPLIACIÓ DEL PORT



Ampliación del Puerto de Barcelona

- **Incremento comercial:** Como ya se ha comentado el puerto de Barcelona ha sufrido un aumento muy importante en lo que se refiere al comercio de mercancías. Según los datos de los diferentes organismos el puerto se está convirtiendo en uno de los más importantes de todo el mediterráneo; con la ampliación que está prevista se

conseguirá posicionar como el mayor puerto comercial de todo el mediterráneo. Actualmente el puerto de Barcelona tiene una capacidad de 47,6 millones de toneladas y 2,3 millones de contenedores; con la ampliación se quiere alcanzar una cifra de 130 millones de toneladas y 10 millones de contenedores. Estos datos no solo lo convertirían en el puerto más importante del mediterráneo sino en uno de los puertos HUB más importante de toda Europa.

- **Conexiones logísticas:** Un dique seco necesita una serie de infraestructuras de transporte asociadas para su correcto funcionamiento, el puerto de Barcelona como tal ya dispone de unas redes de comunicación adecuadas, las cuales se están ampliando a la vez que el puerto crece. Actualmente a la zona portuaria se accede básicamente desde la Ronda Litoral, con la nueva remodelación de las vías se pretende construir un acceso directo desde la C-32 y la A-2 que conecte directamente con el puerto. Además de las vías terrestres, Barcelona dispone de un aeropuerto internacional que permitiría el traslado rápido de técnicos especializados desde otros países para tareas específicas.
- **Fuentes energéticas y materias primas:** Hay una cierta cantidad de materias que no es posible transportarla por los medios usuales de transporte, es por ello que deben existir medios públicos para el aprovisionamiento de dichas materias. La más importante en este caso es el consumo de electricidad, se dispone de una red eléctrica lo suficientemente potente en dicha zona como para poder absorber los consumos que puedan darse en las actividades del dique.
- **Cambio operativo del dique existente:** En el puerto de Barcelona ya existe un dique seco operativo, pero debido a reestructuraciones empresariales de los antiguos concesionados se ha convertido en un dique de reparación para mega-yates y buques de lujo. Es por ello que ha quedado un vacío empresarial en la reparación de buques mercantes muy importante, que debería de ser suplido.

Después de ver las aportaciones que puede proporcionar la ciudad de Barcelona como punto estratégico para situar un astillero con dique seco, es evidente que la propuesta de esta ciudad se puede considerar como acertada para el correcto funcionamiento del mismo.

Cuando un buque entra en dique seco para realizar su reparación implica un gasto muy importante del armador, ya no solo por el coste económico de la reparación si no por el período de tiempo que el barco se encuentra fuera de operación. Es por ello que el armador siempre intentara reducir este tiempo al mínimo; una táctica común es buscar astilleros que se encuentren próximos a las rutas comerciales habituales. Conociendo esta situación se puede hacer una aproximación de cuáles deberían de ser las dimensiones básicas del dique.

Las dimensiones del dique es un factor realmente importante y que puede influir de una forma muy decisiva en la viabilidad de todo el proyecto, es por ello que la toma de esta decisión normalmente viene dada a partir de un estudio exhaustivo del mercado. En nuestro caso se va hacer una simplificación de este análisis ya que no es el objetivo principal de dicho proyecto.

Para comenzar este tipo de estudio es necesario disponer de una base de datos lo suficientemente amplia como para tener un criterio objetivo para tomar las decisiones. Lo apropiado hubiera sido hacer un estudio de todos los puertos del Mediterráneo con los datos de los buques que atracaron durante todo el año del 2010; esta clase de información es muy complicada de obtener porque no son datos de nivel público. Además la cantidad de información con la que trabajar en dicho caso podría ser extremadamente amplia y complicada de clasificar.

En nuestro proyecto se ha tomado una muestra de datos bastante más reducida pero significativa para las aproximaciones que queremos realizar. Los datos con los que vamos a trabajar son pertenecientes a el registro de buques mercantes que realizaron escala en el puerto de Barcelona durante el mes del enero del 2011; dichos datos han sido facilitados por la autoridad portuaria de Barcelona.

Se va a realizar un estudio de las 3 dimensiones básicas que nos interesan para la construcción del dique, eslora, manga y calado.

Eslora:

La eslora es un parámetro crítico en la mayoría de los proyectos navales, la mayoría de buques mercantes se calculan a partir de la dimensión de la eslora, es por ello que una buena elección de este dato puede ser realmente importante en la concepción del dique. La variación de este parámetro en la construcción de un dique es el que menos afectara al coste total de la obra en comparación del resto de dimensiones críticas.

El primer dato que se calculará es el promedio de los valores:

$$Promedio = \frac{\sum_{i=0}^n Li}{n}$$

El valor de dicha ecuación es de 180,46 m.

El siguiente dato a calcular será la varianza que se define como la dispersión de los valores de la muestra:

$$s_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2$$

El valor de dicha función es de 3809,80.

El último valor que es representativo para nuestro análisis es la desviación estándar, es una medida que nos informa como de alejados están los valores respecto de la media aritmética. Se define también como la raíz cuadrada de la varianza de la muestra.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{s_n^2}$$

Si resolvemos dicha ecuación para nuestra muestra se obtiene un valor de 61,72 m.

Para conocer el valor de la dimensión idónea del dique se va a tomar la medida de la media y se le sumara la desviación estándar de la muestra. Esta operación se hace por el siguiente motivo, si se escogiese el valor de la media aritmética solo se podría trabajar con la mitad del mercado; si por el contrario le sumamos el valor de la desviación aumentamos la cuota de mercado por encima del 75% del total.

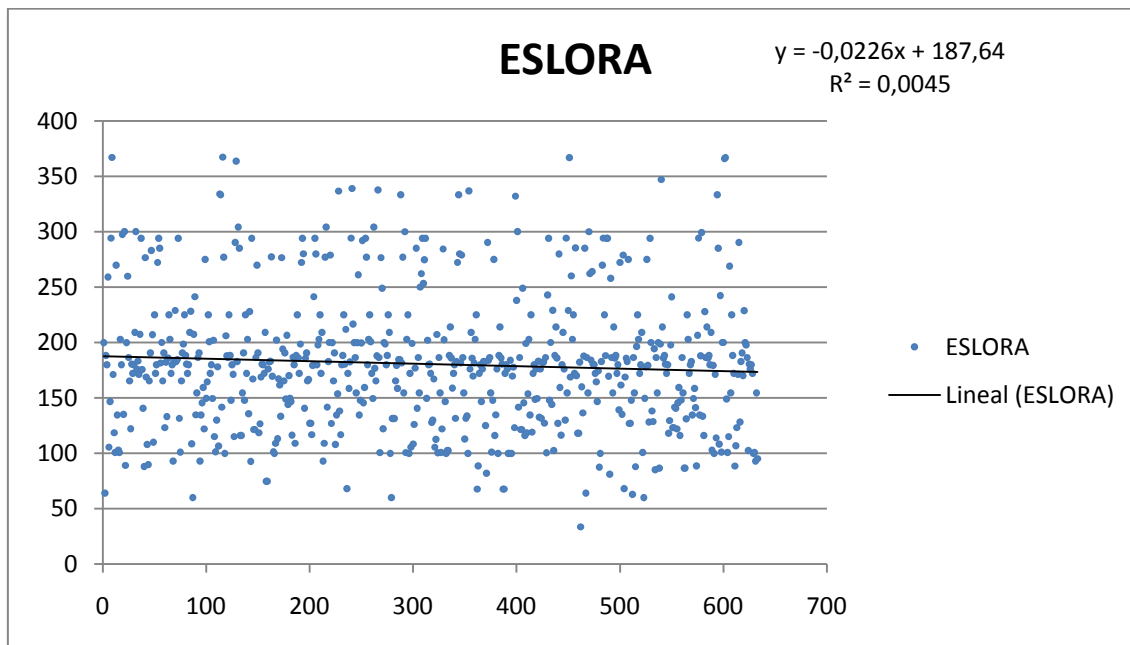


Gráfico de la dispersión de los valores de la eslora

Es por ello que obteniendo un valor exacto de 242,18 m ; se ha optado por la elección de un valor de eslora del dique de 243 m.

Manga:

La manga es uno de los parámetros que más afecta al coste total de la obra, si se aumenta esta el coste de la obra aumentara de manera importante, es por ello que es un valor que se ha de seleccionar en base a la mayor información que se disponga. Esta dimensión suele marcar de manera muy importante que tipo de compuerta se instalara en el dique, ya que dependiendo de su valor hay cierto tipo de compuertas que su construcción sería inviable o con un coste excesivo.

Para obtener el valor idóneo de la manga se ha utilizado la misma metodología que en el caso anterior; el promedio de las distancias es 26,18 m, la varianza de 50,94 y la desviación típica 7,13 m. Estos valores se han obtenido mediante un análisis estadístico como en el caso anterior que se representa en el siguiente gráfico.

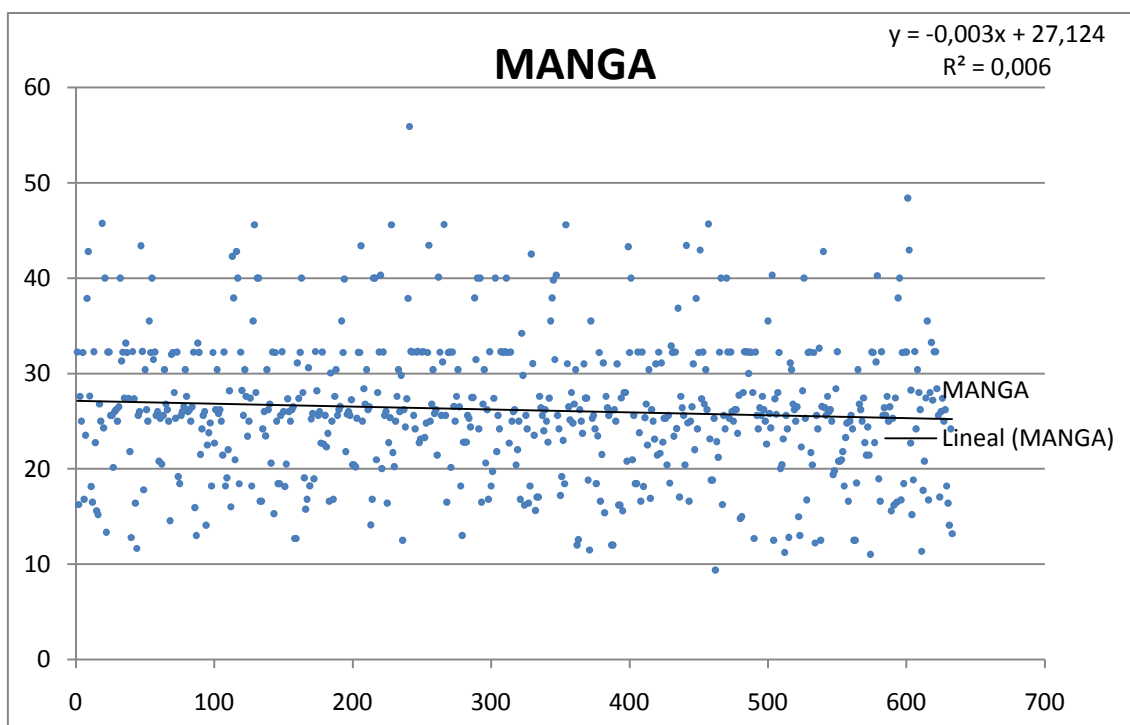


Gráfico de la dispersión de los valores de la manga

Con dichos valores y haciendo la misma suposición que en el caso anterior se obtiene un valor de 33,32m, redondeando dicho valor al alza la manga del dique será de 34m.

Calado:

El calado, al igual que la manga es un parámetro que varía de forma importante el coste total de la obra, otro aspecto que restringe el valor del calado es el calado de los canales de entrada al dique. Los diques secos por norma general se encuentran en canales internos, puertos o por dentro de diques de abrigo; el calado de esta zona será el máximo calado que podrá tener el dique.

Como en los casos anteriores el valor se ha obtenido mediante un análisis estadístico de los datos de que se dispone. El valor del promedio de los calados es de 8,39 m, la varianza de 7,47 y la desviación típica de 2,73m

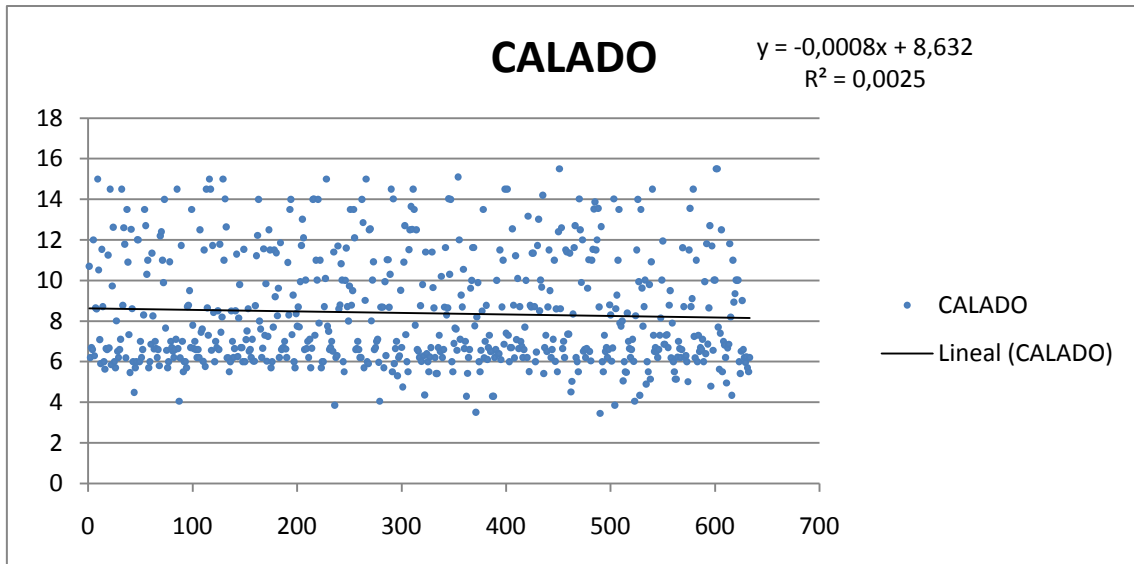


Gráfico de la dispersión de los valores del calado

A partir de dichos valores se ha obtenido un valor de 11,13 m de calado, aproximando se determina que el valor del calado será de 11,5m.

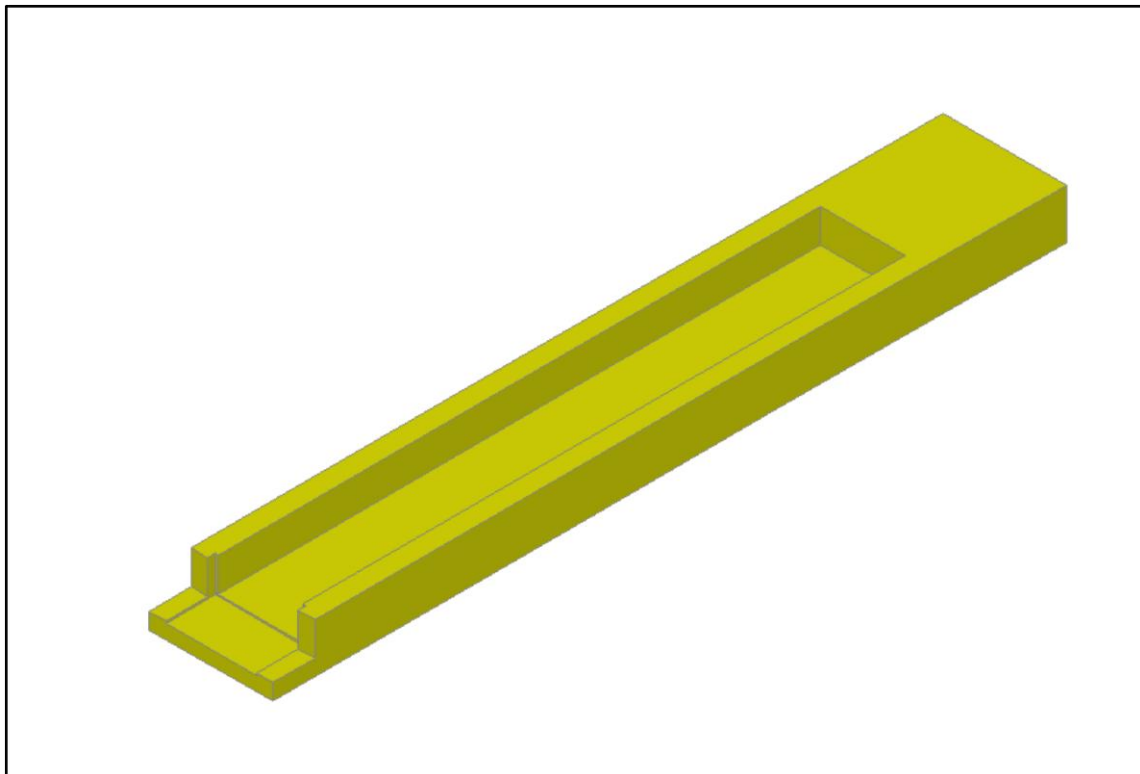


Imagen en CAD del dique seco

Estudio de la apertura y cierre de la compuerta:

Para el estudio de la apertura y cierre de la compuerta se debe realizar un estudio de las ecuaciones producidas por las distintas fuerzas y pesos que convergen en el sistema. Para ello se estudiará el comportamiento de la presión de la columna de agua tanto interior como exterior y posteriormente la situación del eje respecto al ancho de la compuerta. La posición del eje es lo que determinará qué momento es necesario para que la compuerta se mantenga abierta o cerrada según el momento.

Cálculo de la presión en la compuerta:

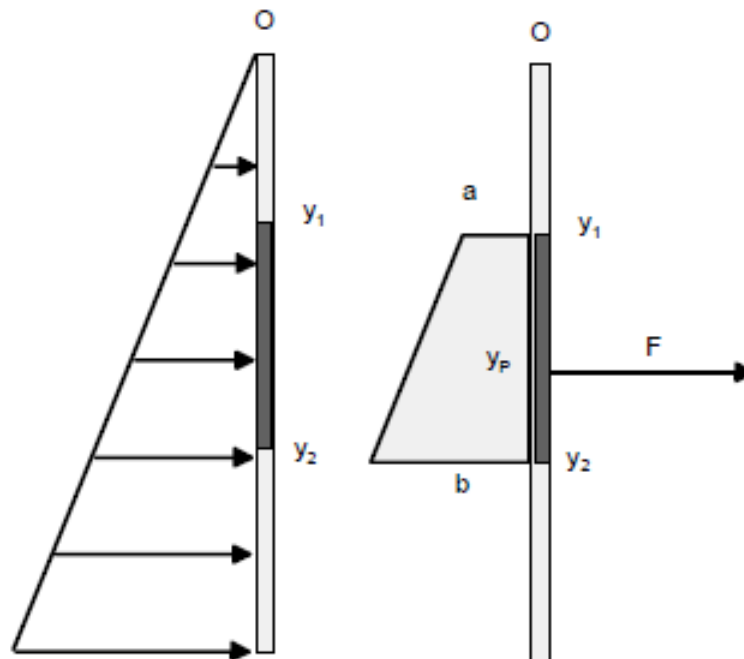
En términos de la profundidad y la fuerza neta que actúa a esa profundidad sobre el elemento de área de ancho w y altura dy es:

$$dF = pw \, dy$$

$$dF = \rho g y w \, dy$$

$$\frac{dF}{dy} = \rho g y w$$

Si trasladamos estas ecuaciones a una placa rectangular que está sumergida a una cierta profundidad, la fuerza resultante debida a la presión corresponden al área y al centroide de la figura correspondiente a la fuerza distribuida entre y_1 e y_2 .



Esquema de la fuerza generada por la presión hidrostática

$$F = \frac{1}{2} \rho g w (y_2^2 - y_1^2)$$

y su punto de aplicación será

$$y_p = \frac{2}{3}h$$

Calculo de pesos

Para el estudio del peso total de la compuerta realizaremos una aproximación inicial que posteriormente podrá ser modificada si es necesario. Para que la compuerta pueda hundirse hasta el fondo de la losa del dique seco, esta deberá tener un peso tal que supere el peso del volumen de agua de mar que desplaza.

Para ello primero es necesario conocer las medidas del cajón que conforma la compuerta, en dicho caso son:

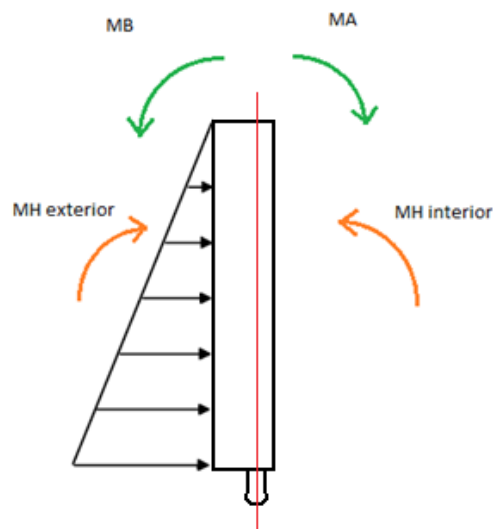
Ancho: 34 m; alto: 13,5 m; grosor: 1 m

Con dichos valores se obtiene un volumen total desplazado de 486 m³.

Para definir el peso total de la compuerta supondremos que es el peso total del agua desplazada más un 20% adicional. Si consideramos la densidad de agua de mar como 1025 kg/m³ se obtiene un peso total de 597780 kg.

Una vez que tenemos la masa total se calcula el peso por metro de grosor de la compuerta, dicho valor es de 5858244 N/m.

Una vez que se tienen los valores y las ecuaciones con las que vamos a trabajar se realizara un estudio de los momentos en cada situación.



Esquema de las fuerzas y momentos aplicados a la compuerta

Cálculo compuerta cerrada con agua en su exterior

Para que la compuerta se mantenga cerrada se debe cumplir que los momentos generados en sentido horario sean más grandes que los generados en sentido anti-horario, para ello se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$MA + MHexterior > MB + MHinterior$$

Si descomponemos los momentos obtenemos que

$$MA = (Kp * dint) * \left(\frac{dint}{2}\right) * ancho$$

$$MHexterior = Fh * \left(\left(\frac{h_{ext}}{3} + deje\right) * ancho\right)$$

$$MB = (Kp * dext) * \left(\frac{dext}{2}\right) * ancho$$

$$MHinterior = Fh * \left(\left(\frac{h_{int}}{3} + deje\right) * ancho\right)$$

Kp es la constante de peso de compuerta por metro de grosor

d_{int} y d_{ext} son la distancia respecto al eje de la compuerta interior y exterior respectivamente.

h_{int} y h_{ext} son las alturas de columna de agua interior y exterior respectivamente.

d_{eje} distancia desde el final del cajón al eje de rotación.

Se debe tener en cuenta que aunque el nivel máximo de agua exterior será de aproximadamente 11,5 m , la altura interior de agua puede llegar hasta 13,5 m lo que permitirá la apertura normal de la puerta.

Si se resuelve dicho sistema de ecuaciones se llega a la conclusión que el momento generado por el exterior supera al generado por el interior cuando la altura del agua interior está en torno a los 9.5 m, es decir solo 2 metros de diferencia con el exterior.

| h interior (m) | M apertura(N*m) | M cierre (N*m) | Diferencia (N*m) | | % |
|----------------|-----------------|----------------|------------------|--|-------------|
| 11,5 | 237189782,4 | 195010425,6 | 42179356,8 | | 0,17782957 |
| 11,25 | 230569499,6 | 195010425,6 | 35559074 | | 0,1542228 |
| 11 | 224220431,8 | 195010425,6 | 29210006,2 | | 0,13027361 |
| 10,75 | 218136928,7 | 195010425,6 | 23126503,1 | | 0,10601828 |
| 10,5 | 212313339,9 | 195010425,6 | 17302914,3 | | 0,08149707 |
| 10,25 | 206744015,3 | 195010425,6 | 11733589,6 | | 0,05675419 |
| 10 | 201423304,3 | 195010425,6 | 6412878,68 | | 0,03183782 |
| 9,75 | 196345556,8 | 195010425,6 | 1335131,17 | | 0,00679991 |
| 9,5 | 191505122,4 | 195010425,6 | -3505303,2 | | -0,01830397 |
| 9,25 | 186896350,9 | 195010425,6 | -8114074,76 | | -0,04341484 |

Cálculo apertura compuerta

Para permitir la apertura de la compuerta sin ningún tipo de mecanismo se ha realizado, como en la caso anterior, un estudio de las presiones hidrostáticas reinantes en la superficie. Se debe tener en cuenta que por el interior de la compuerta la altura de la columna de agua puede llegar hasta los 13,5 m de altura, es decir toda la longitud de la compuerta, por el contrario el agua exterior solo podrá alcanzar una altura en torno a los 11,5 m. Es debido a esta diferencia de alturas que se consigue una apertura de la compuerta sin utilizar elementos mecánicos adicionales.

Para que la compuerta se abra, se debe cumplir que:

$$MA + M_{H_{exterior}} < MB + M_{H_{interior}}$$

Como sucede en el caso anterior las ecuaciones se mantienen por lo que obtenemos un sistema de ecuaciones cuya resolución es la siguiente:

| h interior (m) | M apertura (N*m) | M cierre (N*m) | Diferencia (N*m) | | % |
|----------------|------------------|----------------|------------------|--|-------------|
| 13,5 | 300593822,4 | 195010425,6 | 105583397 | | 0,54142437 |
| 13,25 | 291600408,4 | 195010425,6 | 96589982,7 | | 0,49530676 |
| 13 | 282923411,8 | 195010425,6 | 87912986,2 | | 0,45081172 |
| 12,75 | 274557182,4 | 195010425,6 | 79546756,8 | | 0,40791028 |
| 12,5 | 266496069,9 | 195010425,6 | 71485644,3 | | 0,36657345 |
| 12,25 | 258734424 | 195010425,6 | 63723998,4 | | 0,32677226 |
| 12 | 251266594,3 | 195010425,6 | 56256168,7 | | 0,28847775 |
| 11,75 | 244086930,6 | 195010425,6 | 49076504,9 | | 0,25166093 |
| 11,5 | 237189782,4 | 195010425,6 | 42179356,8 | | 0,21629283 |
| 11,25 | 230569499,6 | 195010425,6 | 35559074 | | 0,18234448 |
| 11 | 224220431,8 | 195010425,6 | 29210006,2 | | 0,1497869 |
| 10,75 | 218136928,7 | 195010425,6 | 23126503,1 | | 0,11859111 |
| 10,5 | 212313339,9 | 195010425,6 | 17302914,3 | | 0,08872815 |
| 10,25 | 206744015,3 | 195010425,6 | 11733589,6 | | 0,06016904 |
| 10 | 201423304,3 | 195010425,6 | 6412878,68 | | 0,0328848 |
| 9,75 | 196345556,8 | 195010425,6 | 1335131,17 | | 0,00684646 |
| 9,5 | 191505122,4 | 195010425,6 | -3505303,2 | | -0,01797495 |
| 9,25 | 186896350,9 | 195010425,6 | -8114074,76 | | -0,04160842 |

Si se analizan los datos se puede observar que sin llegar al límite físico de la compuerta se consigue obtener un momento desde la zona interior hacia el exterior lo suficientemente elevado que vence el momento generado por el agua del exterior y que por lo tanto permite la apertura de la compuerta.

Influencia de la posición del eje en el comportamiento de la compuerta

La situación del eje es lo que nos marcara el punto de aplicación de los momentos que afectan a la compuerta, es por ello que en el cálculo de la dinámica de apertura y cierre se ha tenido en cuenta cual debería ser su distancia respecto al grosor total de la compuerta. Especialmente el eje afectara en los momentos que dependen de la propia compuerta, es decir los momentos generados por el propio peso de la estructura.

Si se dispone el eje muy hacia el interior, la compuerta ganará peso en su banda exterior y por lo tanto tendrá una apertura más fácil y la cantidad de agua que se tenga que introducir será menor. En contra de dicho sistema esta que se debe de vaciar una cantidad mayor de agua para que la compuerta permanezca cerrada durante la maniobra de vaciado.

Por el contrario, si se dispone el eje muy hacia el exterior, la compuerta ganará peso en su banda interior y por lo tanto habrá que extraer una menor cantidad de agua para que el dique permanezca cerrado. En contra dicha disposición hará que la columna de agua necesaria para abrir la compuerta sea superior.

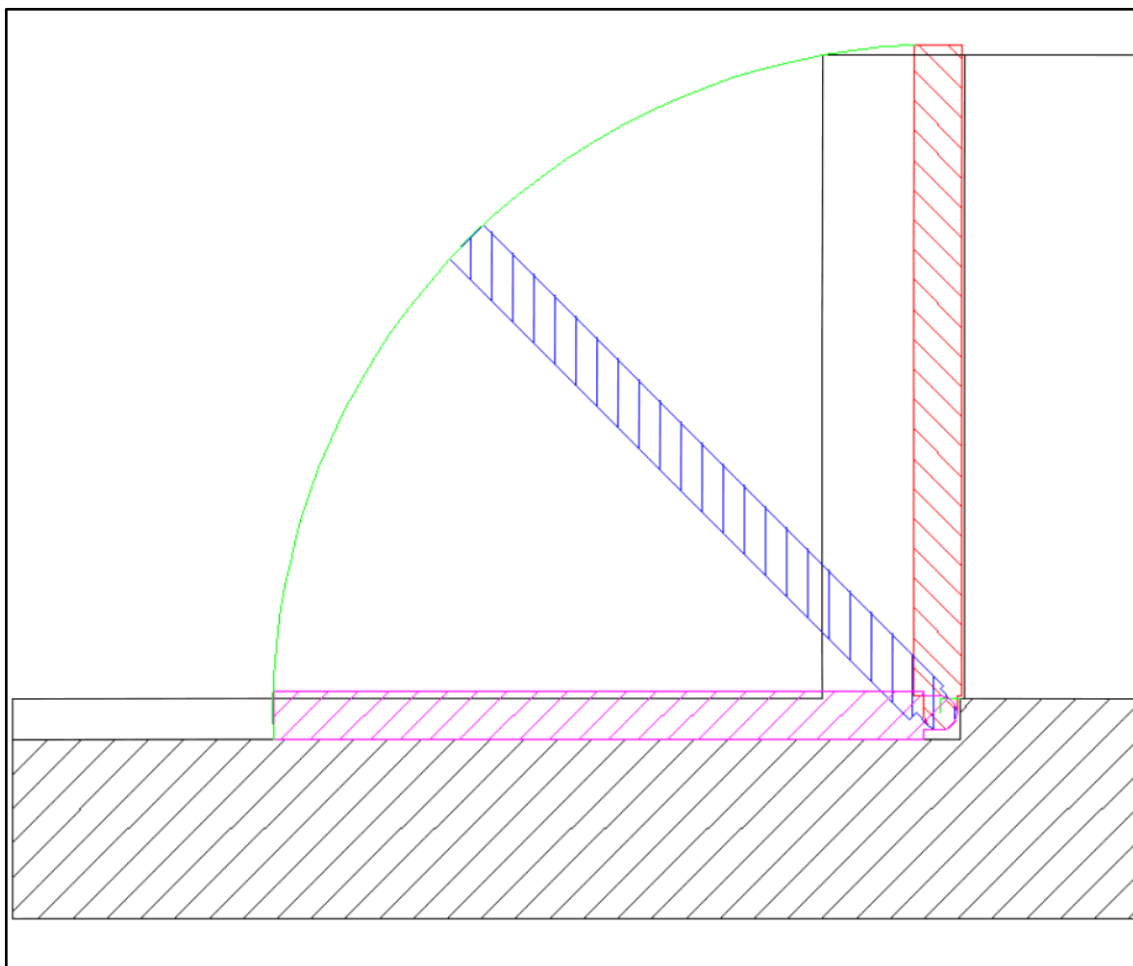
Después de hacer un análisis de distintas distancias se ha obtenido la siguiente tabla:

| M h ext. (N*m) | MA (N*m) | d int (m) | M h. int (N*m) | M B (N*m) | d ext (m) | M cierre (N*m) | M apertura (N*m) | Diferencia (N*m) |
|-------------------|-------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 109597228,1 | 421793568 | 2 | 109597228,1 | 0 | 0 | 531390796,1 | 109597228,1 | 421793568 |
| 109597228,1 | 380668695 | 1,9 | 109597228,1 | 1054483,92 | 0,1 | 490265923,2 | 110651712 | 379614211 |
| 109597228,1 | 341652790 | 1,8 | 109597228,1 | 4217935,68 | 0,2 | 451250018,2 | 113815163,8 | 337434854 |
| 109597228,1 | 304745853 | 1,7 | 109597228,1 | 9490355,28 | 0,3 | 414343081 | 119087583,4 | 295255498 |
| 109597228,1 | 269947884 | 1,6 | 109597228,1 | 16871742,7 | 0,4 | 379545111,6 | 126468970,8 | 253076141 |
| 109597228,1 | 237258882 | 1,5 | 109597228,1 | 26362098 | 0,5 | 346856110,1 | 135959326,1 | 210896784 |
| 109597228,1 | 206678848 | 1,4 | 109597228,1 | 37961421,1 | 0,6 | 316276076,4 | 147558649,2 | 168717427 |
| 109597228,1 | 178207782 | 1,3 | 109597228,1 | 51669712,1 | 0,7 | 287805010,6 | 161266940,2 | 126538070 |
| 109597228,1 | 151845684 | 1,2 | 109597228,1 | 67486970,9 | 0,8 | 261442912,6 | 177084199 | 84358713,6 |
| 109597228,1 | 127592554 | 1,1 | 109597228,1 | 85413197,5 | 0,9 | 237189782,4 | 195010425,6 | 42179356,8 |
| 109597228,1 | 105448392 | 1 | 109597228,1 | 105448392 | 1 | 215045620,1 | 215045620,1 | 0 |
| 109597228,1 | 85413197,5 | 0,9 | 109597228,1 | 127592554 | 1,1 | 195010425,6 | 237189782,4 | -42179356,8 |
| 109597228,1 | 67486970,9 | 0,8 | 109597228,1 | 151845684 | 1,2 | 177084199 | 261442912,6 | -84358713,6 |
| 109597228,1 | 59314720,5 | 0,75 | 109597228,1 | 164763113 | 1,25 | 168911948,6 | 274360340,6 | -105448392 |
| 109597228,1 | 51669712,1 | 0,7 | 109597228,1 | 178207782 | 1,3 | 161266940,2 | 287805010,6 | -126538070 |
| 109597228,1 | 37961421,1 | 0,6 | 109597228,1 | 206678848 | 1,4 | 147558649,2 | 316276076,4 | -168717427 |
| 109597228,1 | 26362098 | 0,5 | 109597228,1 | 237258882 | 1,5 | 135959326,1 | 346856110,1 | -210896784 |
| 109597228,1 | 16871742,7 | 0,4 | 109597228,1 | 269947884 | 1,6 | 126468970,8 | 379545111,6 | -253076141 |
| 109597228,1 | 9490355,28 | 0,3 | 109597228,1 | 304745853 | 1,7 | 119087583,4 | 414343081 | -295255498 |
| 109597228,1 | 4217935,68 | 0,2 | 109597228,1 | 341652790 | 1,8 | 113815163,8 | 451250018,2 | -337434854 |
| 109597228,1 | 1054483,92 | 0,1 | 109597228,1 | 380668695 | 1,9 | 110651712 | 490265923,2 | -379614211 |
| 109597228,1 | 0 | 0 | 109597228,1 | 421793568 | 2 | 109597228,1 | 531390796,1 | -421793568 |

En dicha tabla se puede observar la variación de los momentos en función de la distancia entre el eje y el exterior de la compuerta. En la elección de la distancia optima para la situación del eje han influido varios parámetros:

- La puerta debe tener un momento de apertura positivo, para que con la menor columna de agua posible puede ser abierta.
- Las diferencia de distancias entre ambas longitudes no deben diferir en exceso, ya que si esto sucede debido al peso propio de la estructura se generarían zonas de tensiones más elevadas en algunos puntos que en otros y esto no es adecuado.
- Se debe de disponer de un espacio suficiente en la zona interna de la compuerta para hacer un correcto asiento de la misma con la junta de estanqueidad.
- Se ha de considerar el juego de movimiento de la propia articulación de la compuerta.

Es por ello que las distancias respecto al eje son $d_{int}= 0,45$ m y $d_{ext}= 0,55$ m.



Dinámica de la compuerta

Diseño y cálculo de la compuerta

La compuerta, es el elemento fundamental de todo el proyecto del dique, sin ésta el dique no podría drenarse y por lo tanto no se podría realizar el asentamiento de los buques en la cama del dique. Lo primero que se ha de realizar para comenzar a calcular la estructura de la compuerta es determinar de manera precisa cuáles serán sus dimensiones y las distancias relativas respecto al resto de los elementos del conjunto. Esta parte es muy importante porque los momentos se verán altamente afectados en función de sobre qué distancia este aplicada la fuerza.

| | |
|------------------------|------------------------|
| Ancho interno | 34 m |
| Ancho externo | 36 m |
| Altura compuerta | 13,5 m |
| Altura columna agua | 11,5 m |
| Densidad acero | 7850 kg/m ³ |
| Densidad agua salada | 1025 kg/m ³ |
| Grosor compuerta | 1 m |
| Peso compuerta | 5858244 N |
| Peso compuerta/m ancho | 162729 N |
| Peso/m altura/m ancho | 12054 N/m |
| F hidrostática | 664225,625 N |

Una vez que se tienen determinadas las dimensiones básicas para el cálculo de la estructura se deberán definir como se deberá calcular la estructura y que puntos son los determinantes a la hora de realizar el cálculo. En dicho caso se ha optado por la selección de dos secciones que son las determinantes en el comportamiento general de la compuerta.

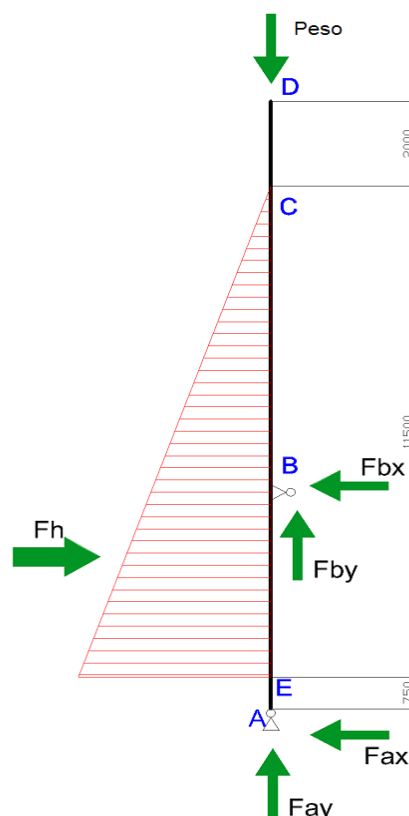
- Sección del apoyo: Se ha escogido dicha sección debido a que la carga hidrostática se repartirá por los distintos apoyos situados a lo largo de la manga de la compuerta, y por lo tanto será una sección de interés mecánico.
- Sección de los extremos en contacto con el dique: son las secciones más alejadas de la línea media de la compuerta, es importante determinar dichas secciones ya que su comportamiento no será el mismo que en el resto de la estructura debido a que las fuerzas se repartirán a lo largo de la estructura de una forma distinta la cual deberá de ser determinada.

A continuación se desglosará el cálculo de esfuerzos y momentos a los que están sometidas cada una de dichas secciones.

Sección con apoyo a 4,5 m respecto al fondo del dique

La sección de apoyo, como se puede observar, tiene dos acciones situadas en ejes perpendiculares; por una banda el peso propio de la estructura, dicha carga se irá reduciendo contra más arriba estemos de la estructura, llegando al límite superior donde dicho peso será nulo. En un eje perpendicular tenemos la fuerza hidrostática del agua de mar que ejerce presión por la cara externa de la compuerta. Dicha fuerza como ya se vio en el apartado anterior se rige a través de las leyes de la hidrostática y mecánica de fluidos.

Una vez se tienen determinadas las acciones se debe realizar el análisis de las reacciones, en este caso tendremos dos puntos donde se nos generarán reacciones. Se comenzará en el apoyo A, dicho apoyo representa a la bisagra



Esquema sección de apoyo de la compuerta

inferior de la compuerta y recibirá tanto cargas en la dirección X e Y, pero no podrá soportar ningún tipo de momentos. El segundo apoyo se trata de B, es el apoyo interno de la compuerta el cual, como en el caso anterior, solo pueden recibir fuerzas en las direcciones X e Y pero no momentos.

Una vez se conocen los distintos puntos de interés de la estructura, y cómo serán sus acciones y sus reacciones se determinarán los valores de éstas. Para ello se hará un estudio de las fuerzas y los momentos en los distintos planos de trabajo y se resolverán las ecuaciones resultantes.

$$\sum F_y = 0; \text{ Peso propio} - F_{Ay} - F_{By} = 0$$

$$\sum F_x = 0; F_H - F_{Bx} - F_{Ax} = 0$$

$$\sum M_{xy} = 0; F_H * d_y - F_{By} * d_{By} = 0$$

| ACCIONES-REACCIONES-MOMENTOS | | |
|------------------------------|------|------|
| $\sum F_x$ | 0,00 | 0,00 |
| $\sum F_y$ | 0,00 | 0,00 |

| | | |
|-----------------|------------|------|
| ΣM_{xy} | 0,00 | 0,00 |
| Fay | -417150,51 | N |
| Fax | 84346,11 | N |
| Fby | 579879,51 | N |
| Fbx | 579879,51 | N |

Una vez que se han obtenido las reacciones de los distintos apoyos se pudo comenzar hacer un estudio de los distintos esfuerzos que sufre la estructura en su conjunto. Para ello se realizarán los cálculos para el esfuerzo axial, cortante y momento flector.

AXIL

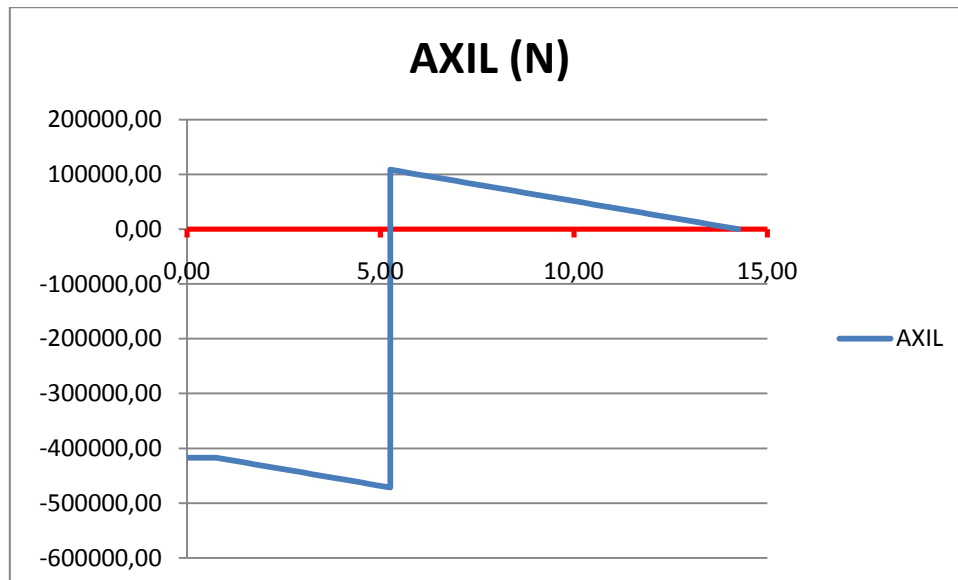
Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AE \rightarrow F_{Ay} = N_{AE}$$

$$EB \rightarrow F_{Ay} - P_{peso} * (h - 0.75) = N_{EB}$$

$$BC \rightarrow F_{Ay} - P_{peso} * (h - 0.75) + F_{By} = N_{BC}$$

$$CD \rightarrow F_{Ay} - P_{peso} * (h - 0.75) + F_{By} = N_{CD}$$



Esfuerzo axial sección apoyo situado a 4,5 m del fondo del dique

Como se puede observar el mayor esfuerzo de la estructura estará situado a 5,25m de la bisagra inferior, lo que corresponde a la posición en la cual está situado el apoyo interno del dique, esto es lógico ya que dicho elemento deberá soportar la carga que se le transmite de la compuerta.

CORTANTE

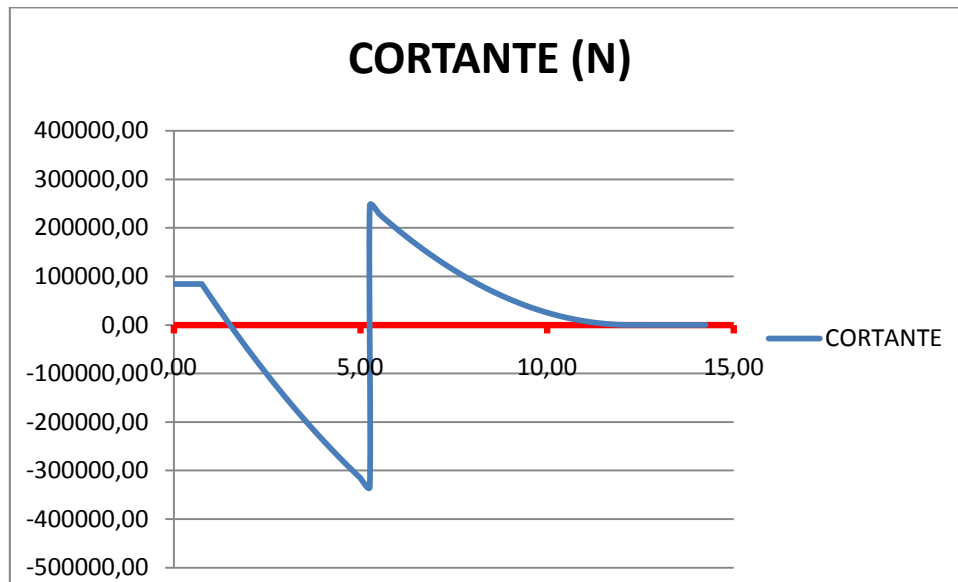
Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AE \rightarrow F_{Ax} = C_{AE}$$

$$EB \rightarrow F_{Ax} - \frac{1}{2}(m * g * [11.5^2 - (12.25 - h)^2]) = C_{EB}$$

$$BC \rightarrow F_{Ax} - \frac{1}{2}(m * g * [11.5^2 - (12.25 - h)^2]) + F_{Bx} = C_{BC}$$

$$CD \rightarrow F_{Ax} - \frac{1}{2}(m * g * [11.5^2 - (12.25 - h)^2]) + F_{Bx} = C_{CD}$$



Esfuerzo cortante sección apoyo situado a 4, 5 m del fondo del dique

De la misma forma que sucedía en el caso anterior el mayor esfuerzo cortante de la estructura vendrá dado por la posición donde se encuentra el apoyo, esto nos indica que dicha sección deberá ser tomada muy en cuenta a la hora de situar los distintos refuerzos internos de la compuerta y se deberá evaluar si es necesario situar algún elemento de refuerzo adicional respecto al resto de la estructura.

MOMENTO FLECTOR

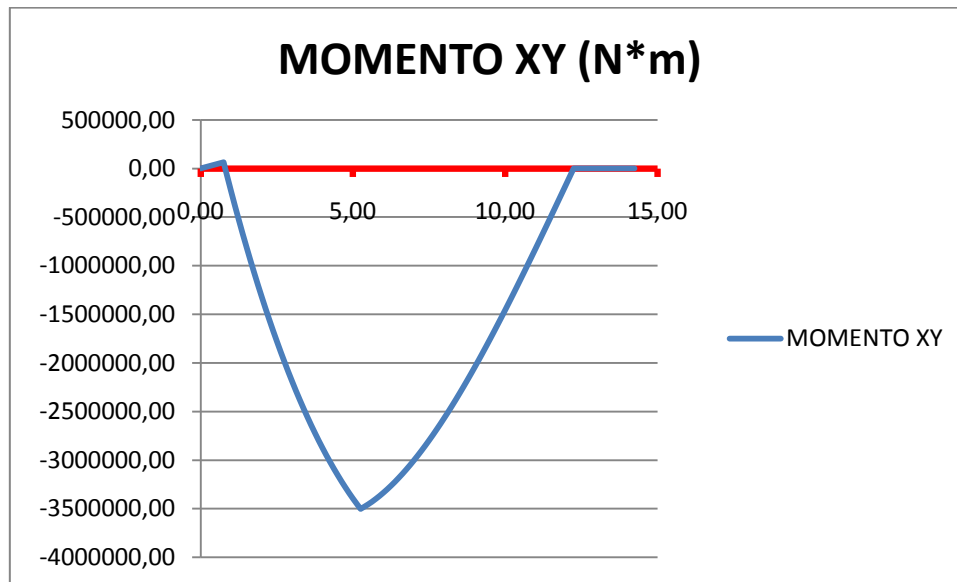
Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$MF_{AE} = F_{Ax} * h$$

$$MF_{EB} = F_{Ax} * h - \left[\frac{1}{2} (m * g * [11,5^2 - (12,25 - h)^2]) * \frac{2}{3} \left(\frac{(12,25 - h)^2 + (12,25 - h) * 11,5 + 11,5^2}{(12,25 - h) + 11,5} \right) \right]$$

$$MF_{BC} = F_{Ax} * h - \left[\frac{1}{2} (m * g * [11,5^2 - (12,25 - h)^2]) * \frac{2}{3} \left(\frac{(12,25 - h)^2 + (12,25 - h) * 11,5 + 11,5^2}{(12,25 - h) + 11,5} \right) \right] + F_{Bx} * (h - 5,25)$$

$$MF_{CD} = F_{Ax} * h - \left[\frac{1}{2} (m * g * [11,5^2]) * \left[\frac{2}{3} 11,5 + (h - 12,25) \right] \right] + F_{Bx} * (h - 5,25)$$



Momento flector sección apoyo situado a 4, 5 m del fondo del dique

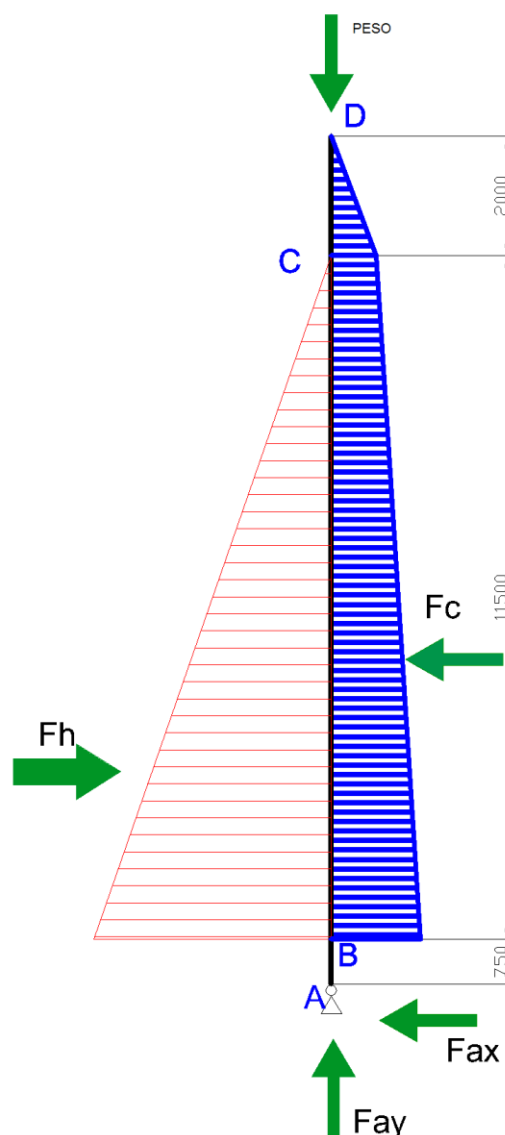
El momento flector de la estructura es uno de los valores que se deberán tener en cuenta a la hora del diseño de la misma debido a las elevadas dimensiones con las que trabajamos el brazo palanca que se genera puede generar problemas graves de tensiones en el material. En dicho caso se puede observar como los momentos flectores están situados en la zona de los negativos, esto no indica que la compuerta flexionará haciendo que los extremos se plieguen hacia la banda exterior del dique y que la zona central intente hundirse hacia dentro del mismo. Dicho gráfico nos da una idea de cómo debemos realizar la estructura, ya que nos indica que en la zona próxima al tercio de la altura de la compuerta se concentran el mayor número de tensiones de todo el conjunto.

Sección con apoyo situado en el extremo del dique

La sección con apoyo situado en el extremo tiene como en el caso anterior dos acciones situadas en ejes perpendiculares con el mismo formato que en el caso anteriormente descrito. Lo que realmente hace distinto dichas dos secciones es que una tiene un apoyo a una cierta altura y este está apoyado por completo en toda su altura.

Las reacciones en el apoyo inferior A, al ser articulado, estarán situadas en el eje X e Y, además su momento será nulo ya que dicho apoyo no admite momentos. Pero la reacción realmente importante en dicho sistema es la respectiva al apoyo de toda la compuerta sobre el conjunto del dique. Dicha reacción no puede ser considerada que está repartida equitativamente, ya que eso solo puede suceder cuando tenemos una superficie la cual sabemos que se mantendrá completamente rígida.

Por este motivo se ha generado la siguiente suposición de reacción; se ha considerado que en la parte inferior del dique, es decir el punto B, el valor de la fuerza se considera $2F_m$, por el contrario en el punto C la fuerza tendrá un valor de F_m y en la parte superior de la compuerta será 0. Con dichos valores obtenemos que de B a C la carga es un trapecio descendente y que de C a D se obtendrá un triángulo rectángulo.



Esquema sección de un extremo de la compuerta

Una vez se determinan las acciones y reacciones del sistema, se deberá hacer un cálculo de los valores de las mismas y los momentos que aparecen en la estructura, para ello se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$\sum F_x = 0; F_R + F_{Ax} - F_H = 0$$

$$\sum F_y = 0; P \text{ peso} - F_{Ay} = 0$$

$$\sum M_{xy} = 0; F_{Ax} * 0 + F_S * h_S + F_T * h_T - F_H * h_H$$

Además de utilizar las siguientes ecuaciones que relacionan las fuerzas de reacción de la zona de contacto del dique:

$$F_T = \frac{2 * F_M}{2} = F_M$$

$$F_S = \frac{2 * F_M + F_M}{2} * 11.5 = \frac{2}{3} * 11.5 * F_M$$

$$F_R = F_S + F_T = 18.25 * F_M$$

$$F_M = \frac{F_R * 17.25}{18.25}$$

$$Y_{p(trapezio)} = \frac{1}{2} * \frac{a + 2b}{a + b} * (y_2 - y_1)$$

$$Y_S = 11.5 - \frac{1}{3} * \frac{(F_M + 4 * F_M)}{(F_M + 2 * F_M)} * (11.5 - h) = 11.5 - \frac{5}{9} * (11.5 - h)$$

Si se resuelven dichas ecuaciones se obtienen las siguientes reacciones:

| | | |
|-----------------|-----------|------|
| ΣF_x | 0,00 | 0,00 |
| ΣF_y | 0,00 | 0,00 |
| ΣM_{xy} | 0,00 | 0,00 |
| F_{ax} | 176948,83 | N |
| F_{ay} | 162729,00 | N |
| F_R | 487276,79 | N |

| Parámetros para el cálculo de las ecuaciones | | |
|--|-----------|---|
| FM | 26700,10 | N |
| 2 FM | 53400,20 | N |
| k1 | 2321,75 | |
| k2 | 13350,05 | |
| FS | 460576,69 | N |
| FT | 26700,10 | N |
| FR | 487276,79 | N |

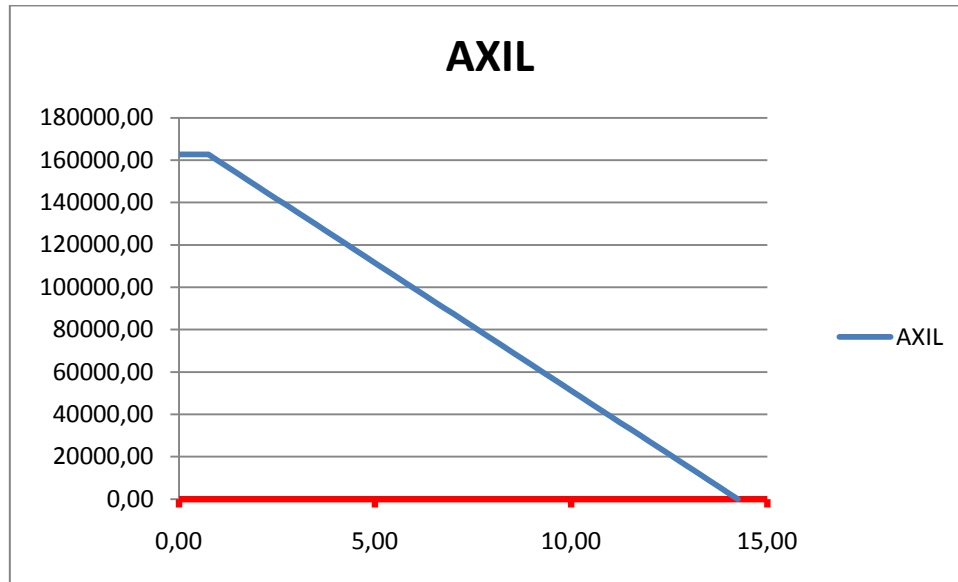
AXIL

Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AB \rightarrow F_{Ay} = N_{AB}$$

$$BC \rightarrow F_{Ay} - P_{propio} * (h - 0,75) = N_{BC}$$

$$CD \rightarrow F_{Ay} - P_{propio} * (h - 0,75) = N_{CD}$$



Esfuerzo axil sección situado en el extremo del dique

Como se puede observar en el gráfico del esfuerzo, éste tiene su máximo en la parte más baja de la compuerta y se va reduciendo como es lógico a medida que se va subiendo debido a que la cantidad de masa de compuerta va disminuyendo.

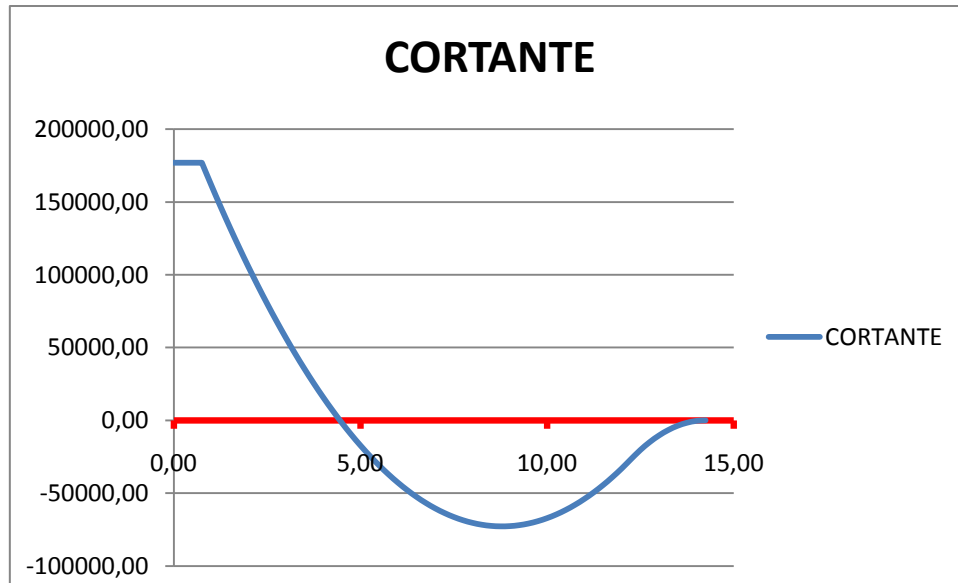
CORTANTE

Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AB \rightarrow F_{Ax} = C_{AB}$$

$$BC \rightarrow F_{Ax} + \left[\frac{[F_{2M} + (F_{2M} - k1 * (h - 0,75))] * (h - 0,75)}{2} \right] - \left[\frac{1}{2} * m * g * (11,5^2 - (12,25 - h)^2) \right] = C_{BC}$$

$$CD \rightarrow F_{Ax} + \left[\frac{[F_{2M} + (F_{2M} - k1 * 11,5)] * 11,5}{2} \right] + \left[\frac{[F_M + (F_M - k2 * (h - 12,25))] * (h - 12,25)}{2} \right] - \left[\frac{1}{2} * m * g * (11,5^2) \right] = C_{CD}$$



Esfuerzo cortante sección situado en el extremo del dique

El esfuerzo cortante varía significativamente respecto a lo que habíamos visto en el caso anterior, en dicho caso su variación no sufre cambios bruscos en ninguna sección, esto es debido a que la compuerta está apoyada en toda su superficie. Otro dato importante es que el esfuerzo cortante está presente por encima del nivel del agua, cosa que anteriormente no pasaba, aunque dichos valores son bastante pequeños.

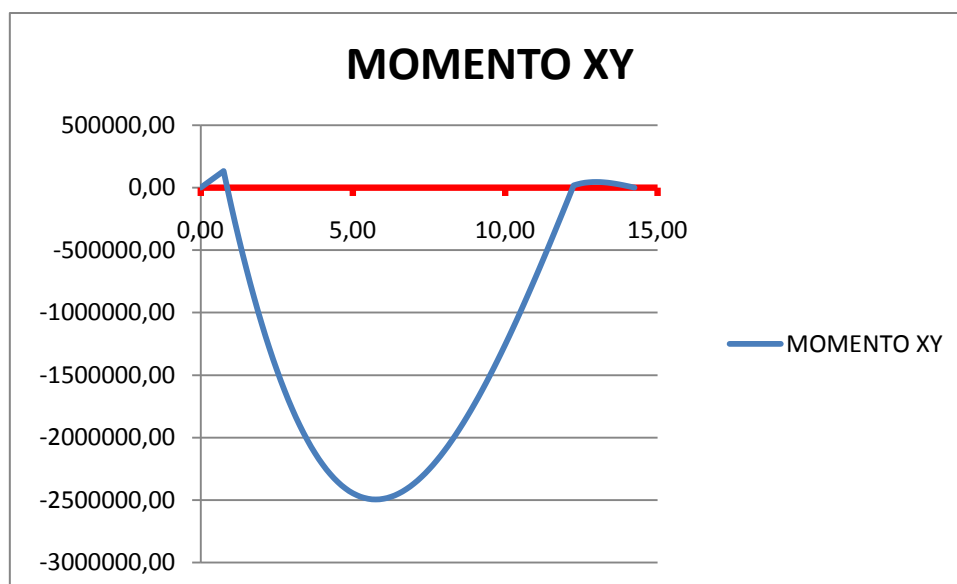
MOMENTO FLECTOR

Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AB \rightarrow F_{Ax} * h$$

$$BC \rightarrow F_{Ax} * h - \left[\frac{1}{2} (m * g * [11,5^2 - (12,25 - h)^2]) \right. \\ \left. * \frac{2}{3} \left(\frac{(12,25 - h)^2 + (12,25 - h) * 11,5 + 11,5^2}{(12,25 - h) + 11,5} \right) \right] \\ + \left[\left[\frac{[F_{2M} + (F_{2M} - k1 * (h - 0,75))] * (h - 0,75)}{2} \right] * \left(\frac{5}{9} * (h - 0,75) \right) \right]$$

$$CD \rightarrow F_{Ax} * h + \left[F_s * \left(\frac{5}{9} * 11,5 + (h - 12,25) \right) \right] - \left[F_H * \left[\frac{2}{3} 11,5 + (h - 12,25) \right] \right] \\ + \left[\frac{[F_M + (F_M - k2 * (h - 12,25))] * (h - 12,25)}{2} \right] \\ * \frac{2}{3} \left(\frac{(h - 14,25)^2 + (h - 14,25) * 2 + 2^2}{(h - 14,25) + 2} \right)$$



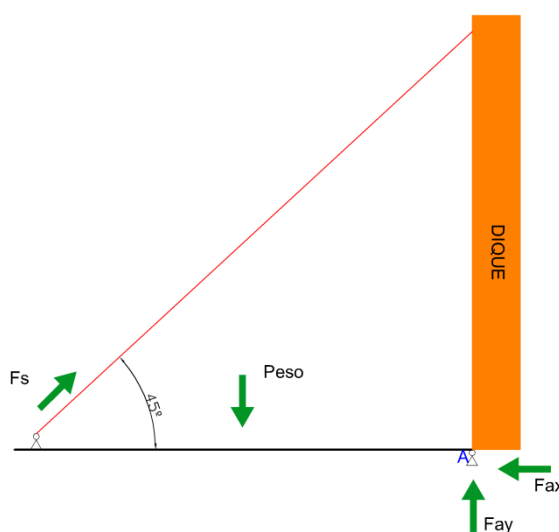
Momento flector sección situado en el extremo del dique

El momento flector es muy similar al descrito en el análisis anterior, existe un pequeño momento hacia el exterior debido a la fuerza de reacción en el apoyo inferior, después el momento empieza a tener un elevado valor hacia el interior de la compuerta. A diferencia del momento de la otra sección esta tiene un cambio suave sin ningún pico significativo.

Análisis compuerta completamente abierta

Otro estudio que se hace esencial a la hora de diseñar y calcular la compuerta se basa en la consideración de la compuerta cuando esta está completamente sumergida y se quiere elevar, En esta situación lo que tendremos es que la estructura se encontrará completamente horizontal y se le aplicará una fuerza en los extremos superiores para poder vencer el peso propio del conjunto.

Como se puede apreciar en la imagen en dicho sistema tendremos la fuerza debida al propio peso de la compuerta, este peso no será el calculado con anterioridad si no será un resta entre el peso total de la compuerta y el volumen de agua que desplaza debido a los principios de sustentación de Arquímedes. Debido a esto el peso a levantar será menor y por lo tanto el esfuerzo de flexión que sufrirá el conjunto se reducirá significativamente en comparación de realizar la misma acción en un entorno no sumergido.



Esquema compuerta completamente abierta

Algunos datos que se utilizan para dicho cálculo están obtenidos en los siguientes apartados del proyecto, pero debido a que se ha utilizado un análisis iterativo en el cálculo inicial de los elementos; datos obtenidos a posteriori nos han obligado a realizar nuevos cálculos de elementos que en un principio no se habían tenido en cuenta.

Como se ha realizado en los casos anteriores, se empezará con un cálculo de las acciones, reacciones y momentos de los elementos de apoyo y posteriormente se efectuarán los análisis de los esfuerzos axil, cortante y momento flector de la compuerta. Las ecuaciones de las acciones de dicho conjunto son:

$$\sum F_x = 0; F_{Ax} - F_C * \cos 45^\circ = 0$$

$$\sum F_y = 0; F_{Ay} + F_C * \sin 45^\circ - P \text{ peso} = 0$$

$$\sum M_{xy} = 0; F_C * \sin 45^\circ * 13,75 - P \text{ peso} \left(\frac{13,5}{2} + 0,75 \right) = 0$$

Si se resuelven dichas ecuaciones se obtienen los siguientes datos:

| | | |
|-----------------|-------------|------|
| ΣF_x | 0,00 | 0,00 |
| ΣF_y | 0,00 | 0,00 |
| ΣM_{xy} | 0,00 | 0,00 |
| Fax | 541443,75 N | |
| Fay | 434930,24 N | |
| Fcx | 541443,75 N | |
| Fcy | 541443,76 N | |
| Peso | 976374,00 N | |
| Peso/m | 72324 N | |

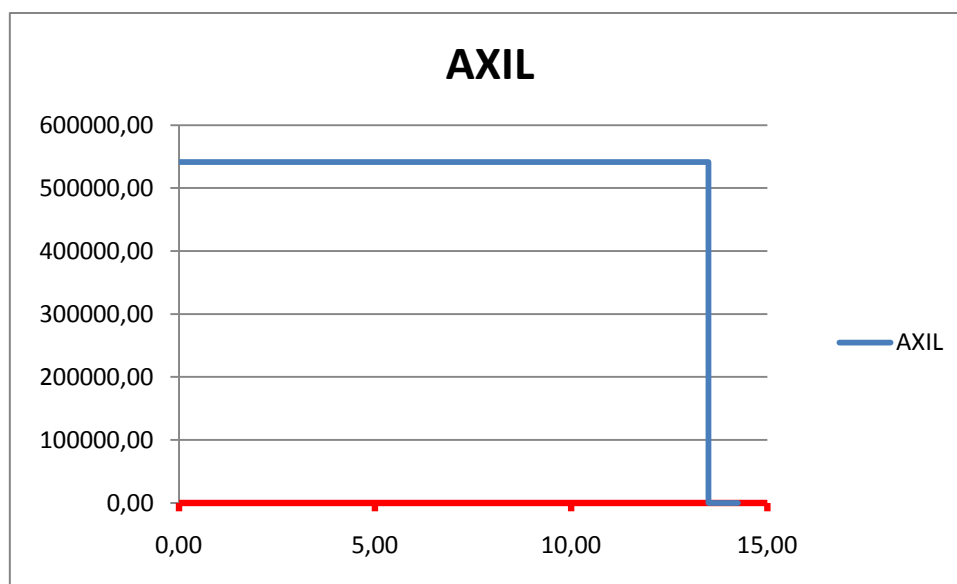
AXIL

Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AB \rightarrow F_{AX} = N_{AB}$$

$$BC \rightarrow F_{AX} = N_{BC}$$

$$CD \rightarrow F_{AX} - F_C * \cos 45^\circ = N_{CD}$$



Esfuerzo axial compuerta completamente abierta

Como se puede ver en la imagen el momento axial es totalmente constante a lo largo de la compuerta con un valor no demasiado excesivo si lo comparamos con el resto de los valores obtenidos con anterioridad. Dicho esfuerzo viene dado por la descomposición de la fuerza debida a la elevación de la compuerta que es transmitida a lo largo de la misma hasta llegar al apoyo de la misma.

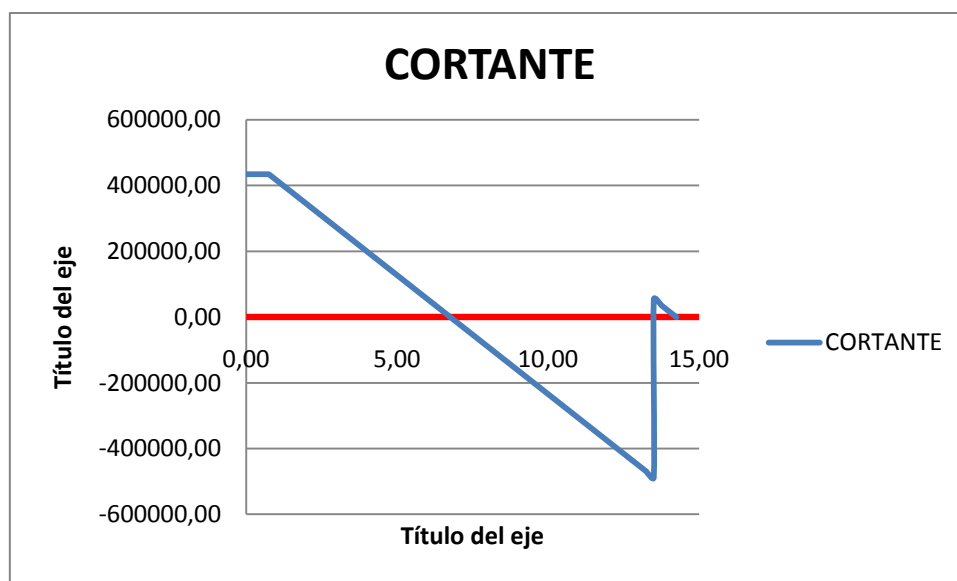
CORTANTE

Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AB \rightarrow F_{AY} = C_{AB}$$

$$BC \rightarrow F_{AY} - \frac{P}{m} * (x - 0.75) = C_{BC}$$

$$CD \rightarrow F_{AY} - \frac{P}{m} * (x - 0.75) + F_C * \sin 45^\circ = C_{CD}$$



Esfuerzo cortante compuerta completamente abierta

Como se puede observar en el gráfico anterior, existe una disminución lineal del esfuerzo cortante a lo largo de la compuerta llegando a ser contrario al inicial una vez pasado los 10 m desde el apoyo de la misma. Se observa que en el punto donde la compuerta recibe la fuerza para ser elevada se produce un cambio brusco en el esfuerzo cortante de la misma.

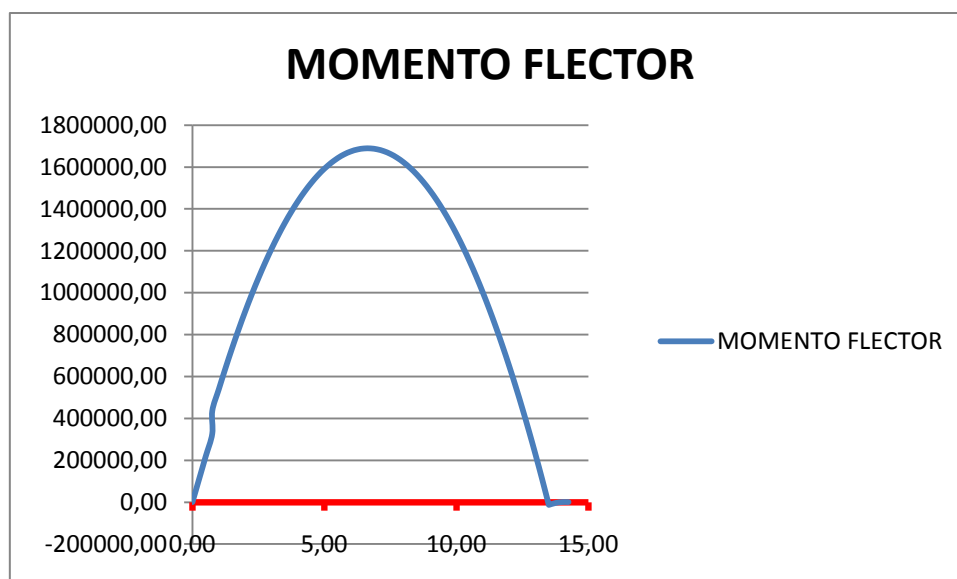
MOMENTO FLECTOR

Se determinan las ecuaciones del sistema y posteriormente se resuelven para todos los valores a lo largo de la estructura y se representan en un gráfico, los valores numéricos están situados en los anexos:

$$AB \rightarrow F_{AY} * x = C_{AB}$$

$$BC \rightarrow F_{AY} * x - [P/m * (x - 0.75)] * [(d - 0.75)/2 + 0.75] = C_{BC}$$

$$CD \rightarrow F_{AY} * x - \left[\frac{P}{m} * (x - 0.75) \right] * \left[\left(\frac{d - 0.75}{2} \right) + 0.75 \right] + F_C * \sin 45^\circ * (x - 13.75)$$



Momento flector compuerta completamente abierta

El esfuerzo debido al momento flector es como se esperaba aproximadamente una parábola, la cual tiene su valor máximo en el punto medio geométrico de la misma ya que está sujeta en ambos extremos. Su valor máximo aunque es elevado no supera el valor obtenido en los casos anteriores, debido a ser más desfavorables se consideran los otros para el diseño de la misma.

Diseño de la estructura interna de la compuerta

Para el diseño de los refuerzos internos a situar en la compuerta se ha utilizado el cálculo anterior, se han seleccionado los valores máximos obtenidos en cada situación y por último se han escogido los valores máximos totales. Con estos valores se ha realizado un cálculo del esfuerzo al que está sometido la estructura aplicándole un cierto grado de seguridad en todos los elementos. Dichos cálculos se muestran en la siguiente tabla.

| | | | |
|-------------|--------------|----------|----------------|
| Longitud | 100,00 cm | | |
| Ancho | 100,00 cm | | |
| HEB 300 | | Ix total | 2122784,00 cm4 |
| nº perfiles | 4,00 | | 1411800,00 cm5 |
| altura | 30,00 cm2 | | 710984,00 cm6 |
| Área | 149,00 cm | | |
| Ix cm4 | 25170,00 cm4 | | |
| PLANCHA | | | |
| Largo | 100,00 cm | | |

| | | |
|-------|--------|-----------------|
| Ancho | 3,00 | cm |
| Área | 300,00 | cm ² |
| Ix | 225,00 | cm ⁴ |

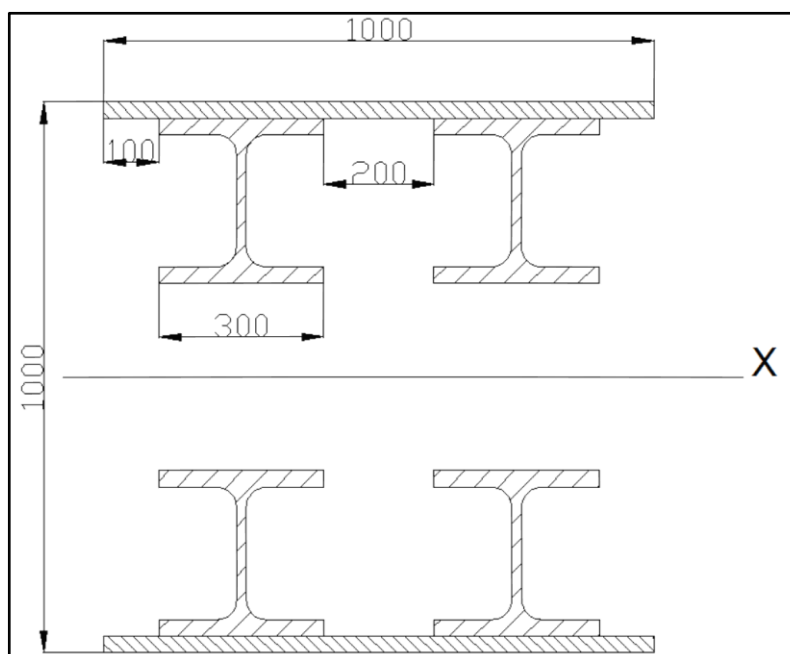
Caso 1

| | | | |
|----------|------------|-----------|-------|
| Axil | 162729,00 | 162,73 | KN |
| Cortante | 176948,83 | 176,95 | KN |
| Flector | 2494351,47 | 249435,15 | KN*cm |

| | | | |
|-------------------|-----------|------|--------------------|
| σ tracción | x axil | 0,14 | KN/cm ¹ |
| | x flector | 5,88 | KN/cm ² |

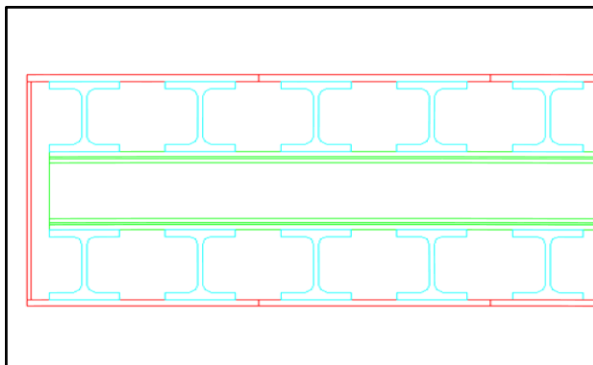
| | | | | |
|--------------------|----------|-----------------|------|----------------|
| Área disponible | 10000,00 | cm ² | 1,00 | m ² |
| Área total | 1196,00 | cm ² | 0,12 | m ² |
| Área min necesaria | 1566,88 | cm ² | 0,16 | m ² |
| Área restante | 370,88 | cm ² | 0,04 | m ² |

Para realizar el cálculo se trabaja con una sección de un metro de ancho de la compuerta, en el cual se situarán los perfiles correspondientes para soportar los esfuerzos, esta sección se repetirá a lo ancho de toda la compuerta. En nuestro caso se utilizarán unos perfiles HEB 300 situados verticalmente para evitar la flexión vertical, por el contrario se utilizaran perfiles HEB 340 para evitar la flexión longitudinal.

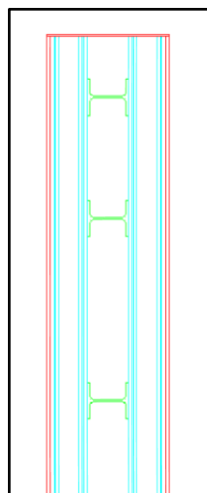


Inercia de la compuerta

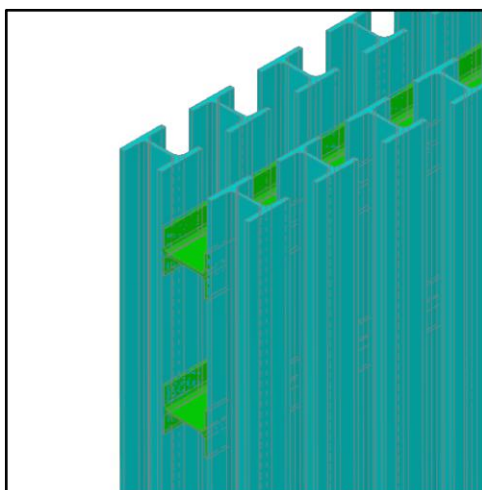
A continuación se muestran distintos detalles de la compuerta y de sus elementos rigidizadores:



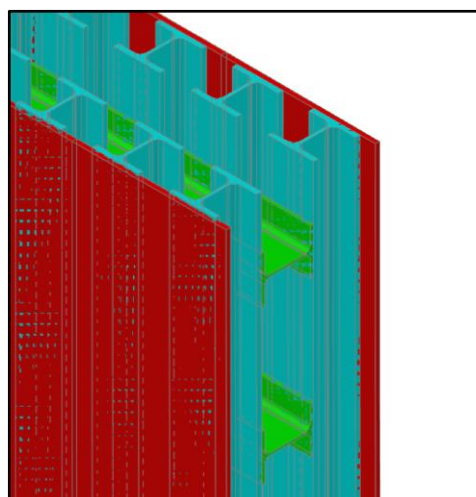
Vista superior compuerta



Vista lateral compuerta



Vista CAD elementos rigidizadores



Vista CAD elementos rigidizadores

Cálculo por elementos finitos

Después de haber realizado el cálculo manual de la compuerta, se ha decidido realizar el mismo cálculo mediante un programa informático de cálculo estructural, para ello se ha utilizado el programa Ram Series. En este apartado se va a explicar cómo se ha realizado dicho cálculo y que datos se han obtenido después de dicho análisis.

Diseño de la geometría:

Lo primero que se debe realizar es una geometría de trabajo en la cual pondremos todas nuestras condiciones para realizar el análisis estructural. En nuestro caso se ha optado por hacer el estudio únicamente de los refuerzos internos de la compuerta, ya que las planchas exteriores no trabajarán sino que solo hacen de medio de estanqueidad para el conjunto de la compuerta.

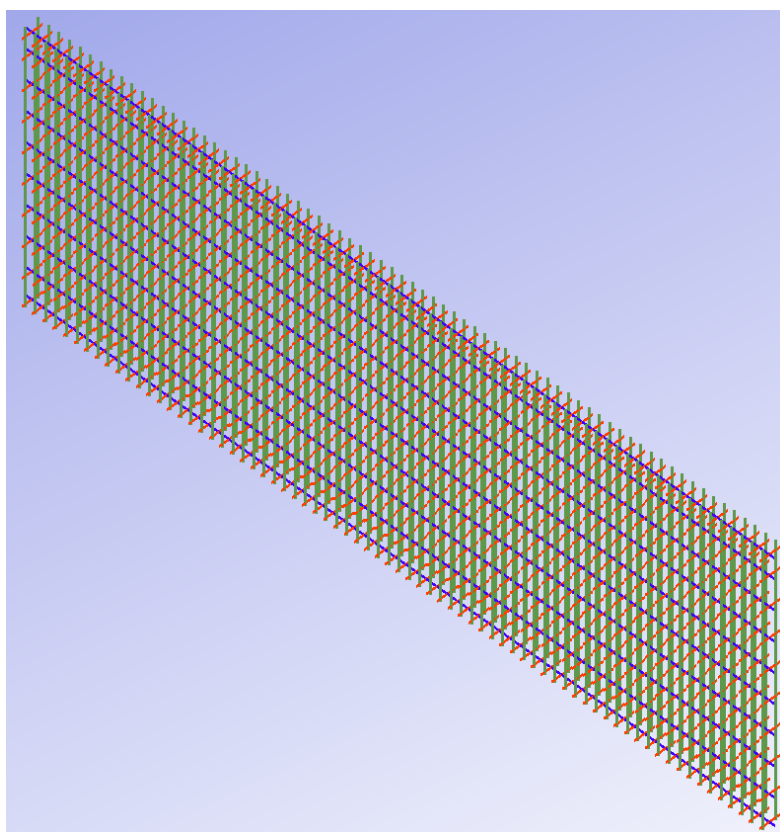
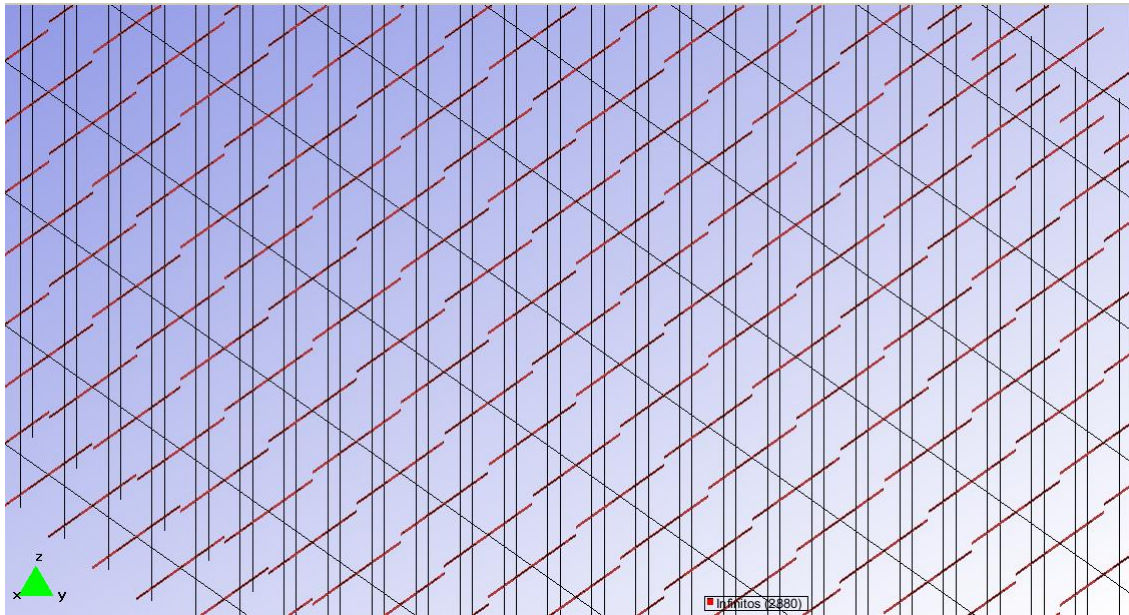


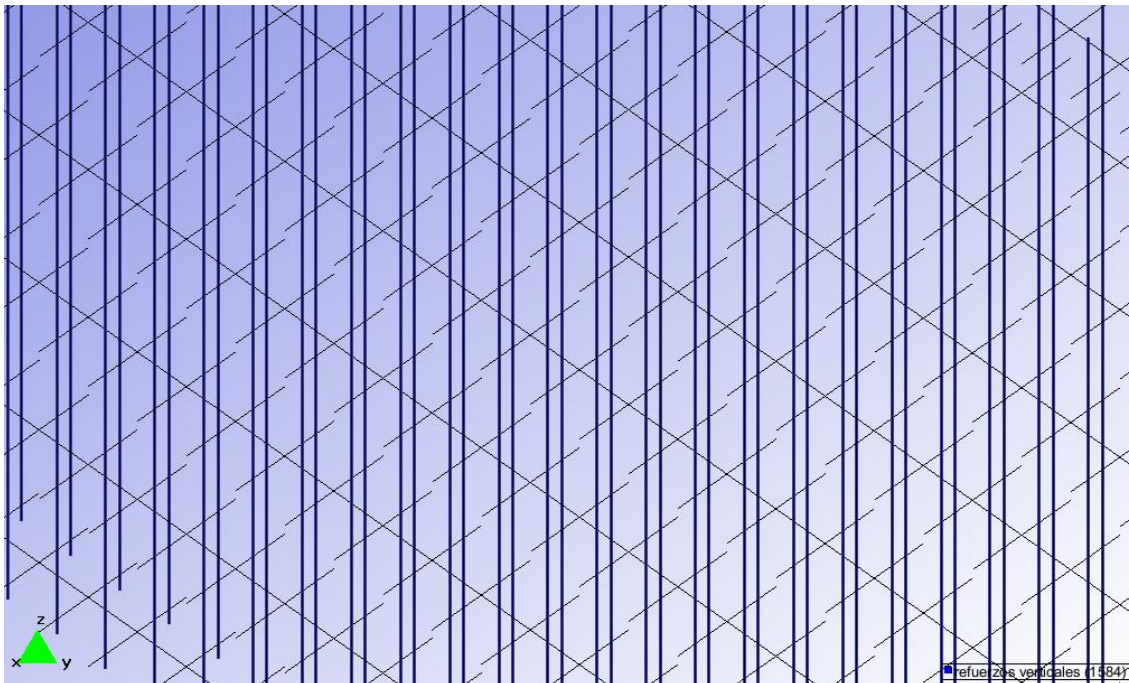
Imagen geometría de la compuerta

La geometría de la compuerta tiene ciertas particularidades, para simplificarla lo que se realiza es una geometría de barras, cada una de las barras está situada en el centro geométrico de cada una de las vigas. Para la unión entre las vigas horizontales y verticales se han definido unas nuevas vigas de sección infinita y con resistencia definida de la misma forma. Esto se hace porque como los centros geométricos de los refuerzos no se tocan, es necesario definir unos

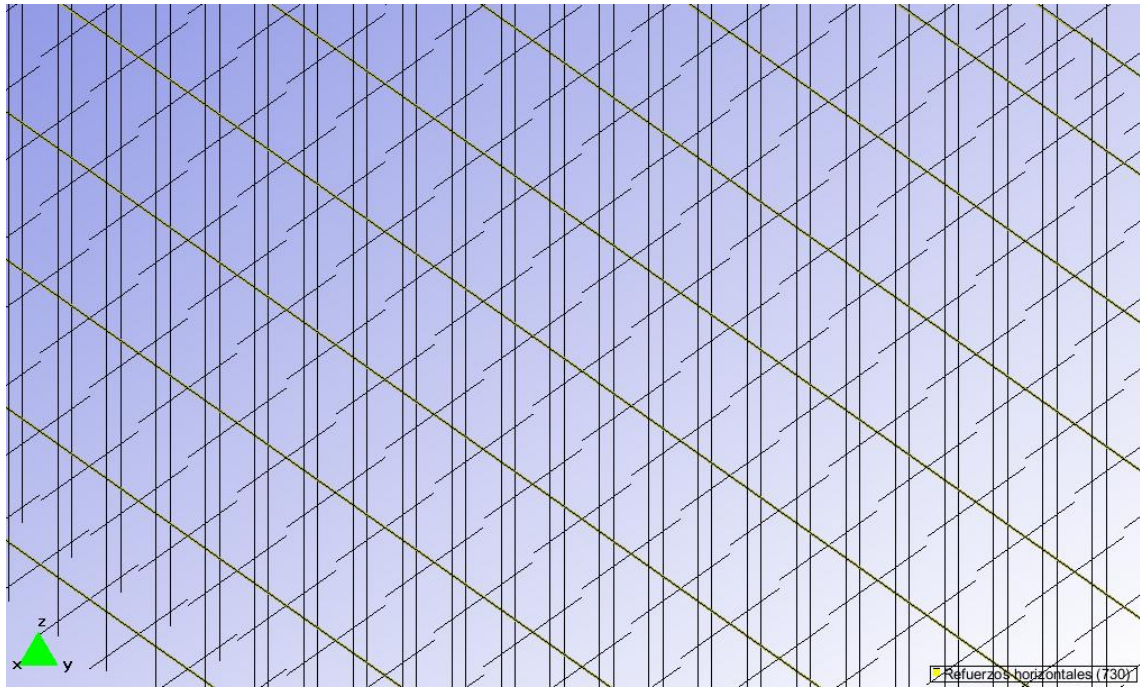
elementos que simulen las uniones entre éstos. A continuación se muestran cada uno de los grupos de los elementos por separado:



Detalle de los elementos infinitos de la malla



Detalle de los elementos verticales de la malla



Detalle de los elementos horizontales de la malla

Propiedades de la geometría:

La geometría de la compuerta, como ya se ha comentado, se basa en una serie de refuerzos horizontales y verticales; además de unos elementos imaginarios que se han debido de poner para que el programa realizase los cálculos de forma correcta. Cada uno de ellos se ha definido con una serie de características las cuales hacen que el conjunto trabaje de forma adecuada.

- Propiedades de las barras:
 - Refuerzos verticales: Se definen como perfiles HEB-300 cuyas propiedades son las siguientes:

$A=149.1\text{cm}^2$ $I_y=2.517\text{e}+004\text{cm}^4$ $I_z=8560\text{cm}^4$

$I_{yz}=1\text{cm}^4$ $J=192\text{cm}^4$ $W_y=1680\text{cm}^3$

$W_z=571\text{cm}^3$ $A_{ty}=114\text{cm}^2$ $A_{tz}=33\text{cm}^2$

$Y_g=15\text{cm}$ $Z_g=15\text{cm}$

Z axe position=0.0cm

$I_a=1.688\text{e}-006\text{m}^6$

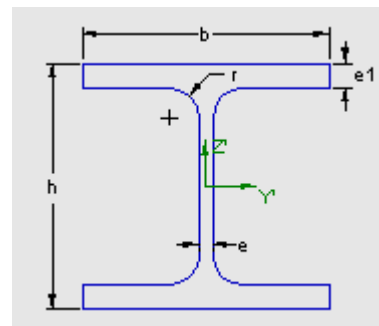
$S_y=934\text{cm}^3$ $a=2.5\text{cm}$ $b=30\text{cm}$

$e=1.1\text{cm}$ $e_1=1.9\text{cm}$ $h=30\text{cm}$

$h_1=20.8\text{cm}$ $i_y=13\text{cm}$ $i_z=7.58\text{cm}$

$p=1146.6$ $r=2.7\text{cm}$ $u=173\text{cm}$

$w=12\text{cm}$ $w_1=5\text{cm}$



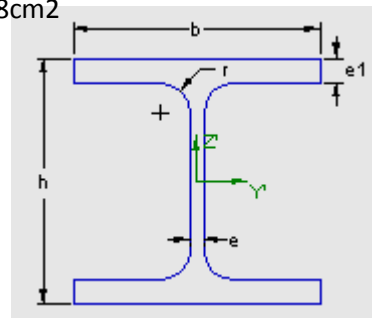
El material seleccionado ha sido el Acero estructura A-52 cuyas propiedades son las siguientes:

$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 $G = 8.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
 $\nu = 0.3$
 Peso específico = 76900 N/m^3
 Máximo esfuerzo = $352.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

- Refuerzos horizontales: Se definen como perfiles HEB-350 cuyas propiedades son las siguientes:

$A = 170.9 \text{ cm}^2$ $I_y = 3.666 \times 10^4 \text{ cm}^4$ $I_z = 9690 \text{ cm}^4$
 $I_{yz} = 1 \text{ cm}^4$ $J = 278 \text{ cm}^4$ $W_y = 2160 \text{ cm}^3$
 $W_z = 646 \text{ cm}^3$ $A_{ty} = 129 \text{ cm}^2$ $A_{tz} = 40.8 \text{ cm}^2$
 $Y_g = 15 \text{ cm}$ $Z_g = 17 \text{ cm}$
 Z axe position = 0.0 cm

$I_a = 2.454 \times 10^{-6} \text{ m}^6$
 $S_y = 1200 \text{ cm}^3$ $a = 2.5 \text{ cm}$ $b = 30 \text{ cm}$
 $e = 1.2 \text{ cm}$ $e_1 = 2.15 \text{ cm}$ $h = 34 \text{ cm}$
 $h_1 = 24.3 \text{ cm}$ $i_y = 14.6 \text{ cm}$ $i_z = 7.53 \text{ cm}$
 $p = 1313.2$ $r = 2.7 \text{ cm}$ $u = 181 \text{ cm}$
 $w = 12 \text{ cm}$ $w_1 = 5 \text{ cm}$



El material seleccionado ha sido el Acero estructura A-52 cuyas propiedades son las siguientes:

$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 $G = 8.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
 $\nu = 0.3$
 Peso específico = 76900 N/m^3
 Máximo esfuerzo = $352.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

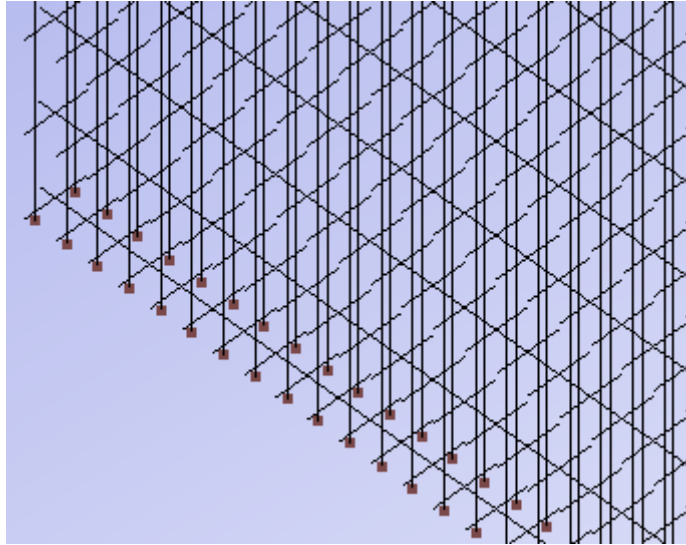
- Elementos de unión entre refuerzos: Se definen con las siguientes características:

- Área: 3000 m^2
- Inercia sobre Y: 30000 m^4
- Inercia sobre Z: 30000 m^4
- $J: 30000 \text{ m}^4$
- $E: 2.1 \times 10^{20} \text{ N/m}^2$
- $G: 8.1 \times 10^{20} \text{ N/m}^2$
- Peso específico: 0.0 N/m^2

Condiciones de contorno

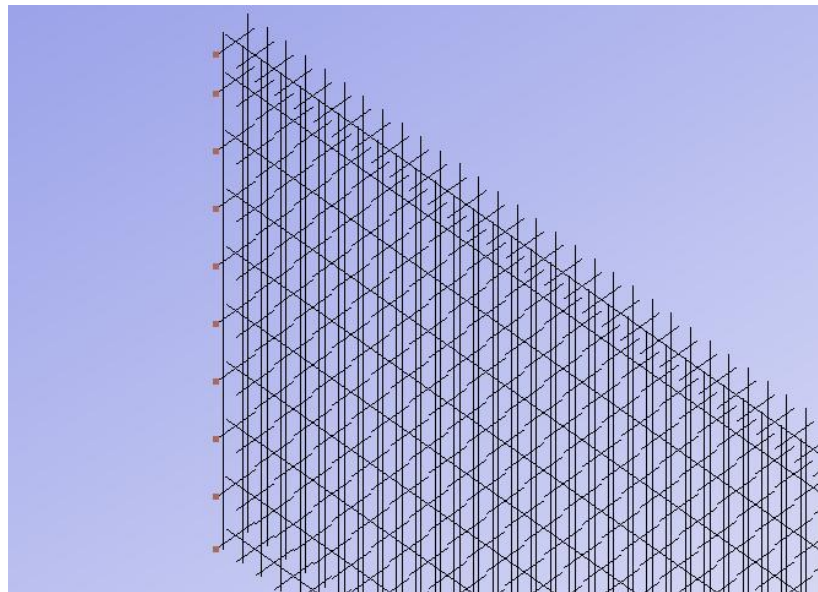
En este paso se deben definir como nuestro conjunto está unido hacia el exterior del problema que deseamos analizar, es decir qué tipo de apoyos y sujeciones tiene. En nuestro caso se pueden dividir en 3 grupos completamente diferenciados.

- Apoyos inferiores: Se definen como un apoyo empotrado completamente esto hace que pueda soportar acciones en todas las direcciones y momentos en los mismos planos.



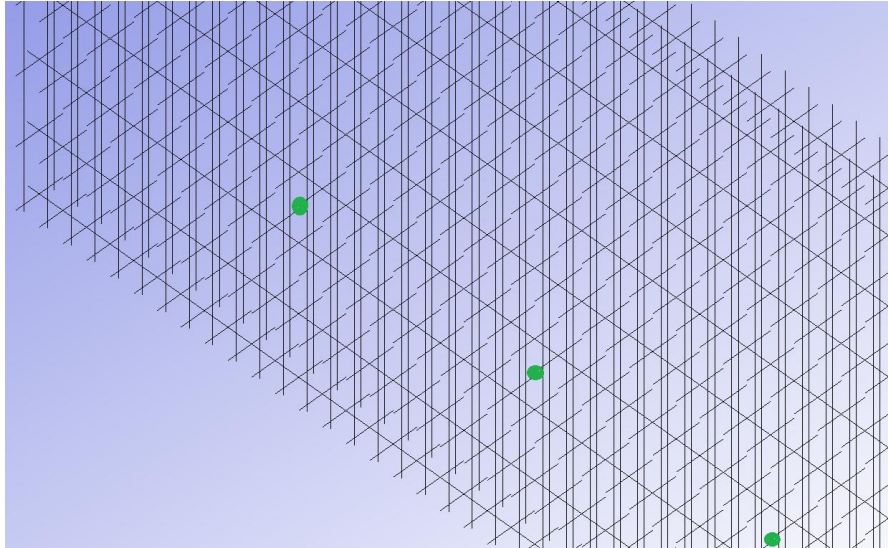
Representación de los apoyos inferiores

- Apoyos laterales: Se define como que está apoyada en una superficie y por lo tanto no puede tener movimientos horizontales en la dirección longitudinal del dique.



Representación de los apoyos laterales

- Apoyos internos: Se definen en los puntos geométricos de los apoyos internos y se consideran las mismas condiciones que los apoyos laterales.

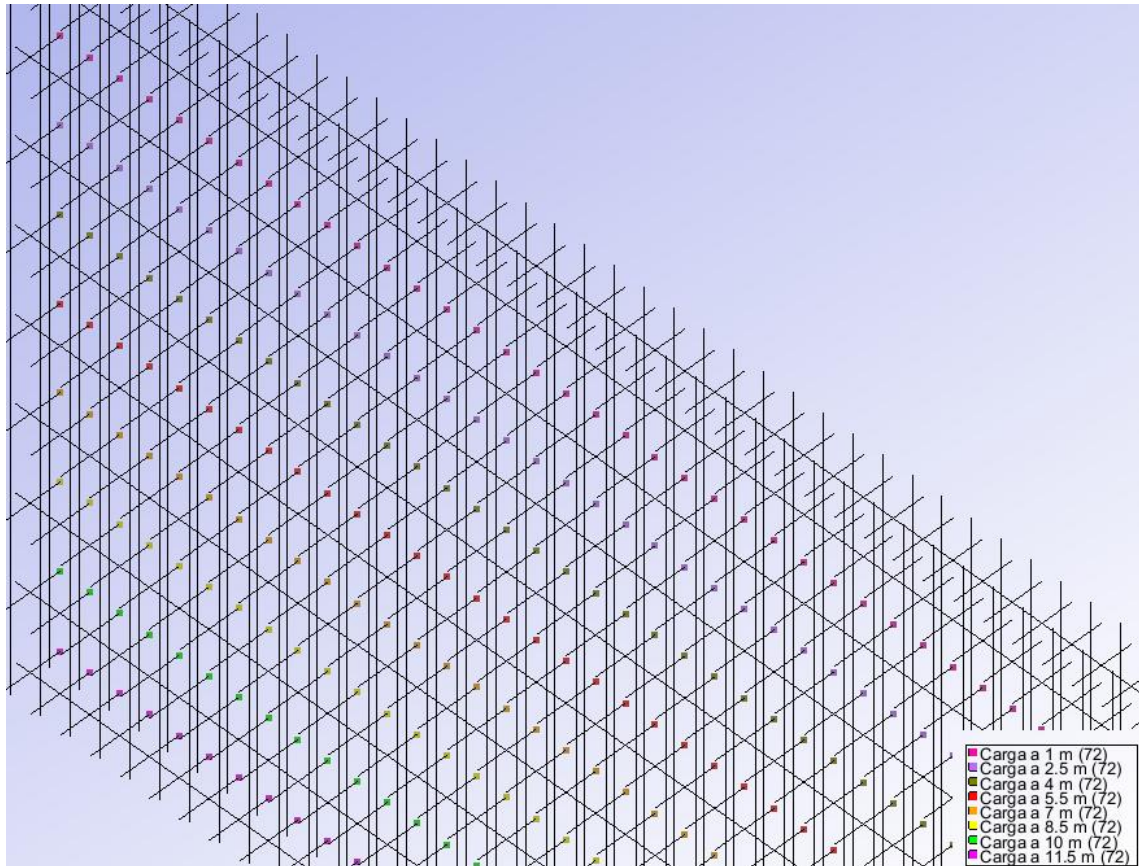


- Representación de los apoyos interiores

Acciones aplicadas

La acción que se realiza al sistema es la carga hidrostática sobre la superficie de la compuerta, como nosotros solo tenemos unos puntos que definen el contacto entre los perfiles y la compuerta, lo que se hará es definir las cargas puntuales sobre esos puntos; la cual es una aproximación válida para el cálculo general.

- Carga a 11,5m de profundidad: 55758.5 N
- Carga a 10m de profundidad: 50225 N
- Carga a 8,5m de profundidad: 42691 N
- Carga a 7m de profundidad: 35157 N
- Carga a 5,5m de profundidad: 27623 N
- Carga a 4m de profundidad: 20090 N
- Carga a 2,5m de profundidad: 12556.25 N
- Carga a 1m de profundidad: 5022.5 N



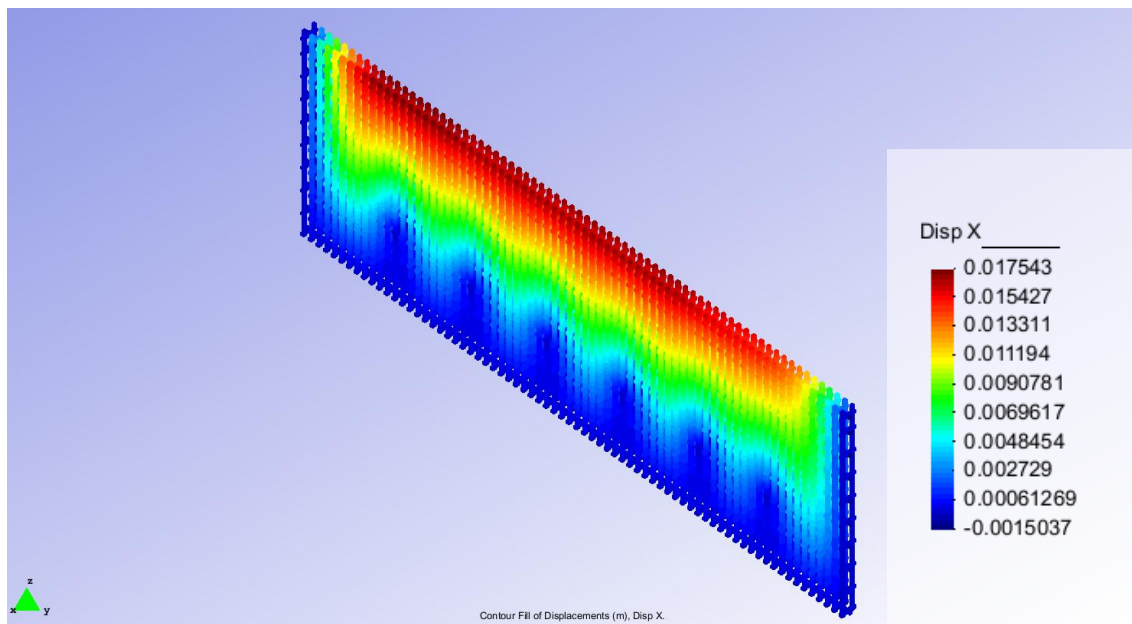
- **Representación de las cargas aplicadas**

Una vez realizado todo el proceso de generación de nuestro modelo se debe realizar el cálculo del mismo para ello el programa dispone un conjunto de aplicaciones para calcular por distintos métodos. En nuestro caso se ha seleccionado el método "HIBRID SPARSE", el cual es bastante rápido y para nuestro sistema es más que suficiente y evita la necesidad de esperar el conjunto de iteraciones del resto de métodos.

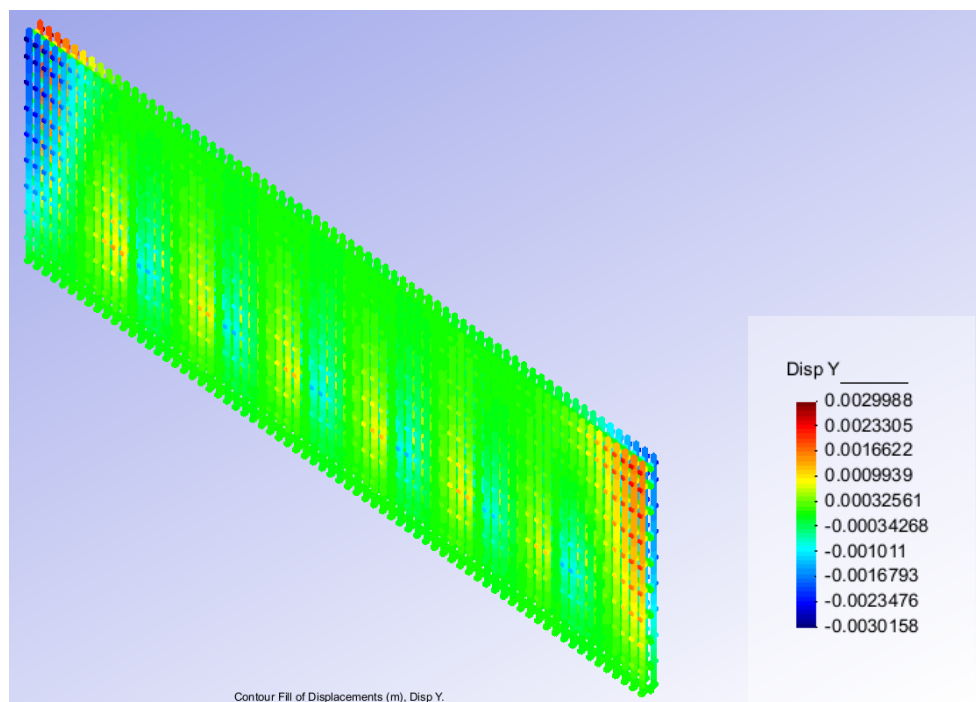
Resultados obtenidos:

A continuación debemos ir al postproceso hay es donde se nos mostrará los datos obtenidos de las distintas propiedades. A continuación se irán mostrando los datos que se han obtenido y comentando aquellos datos que se crea necesario.

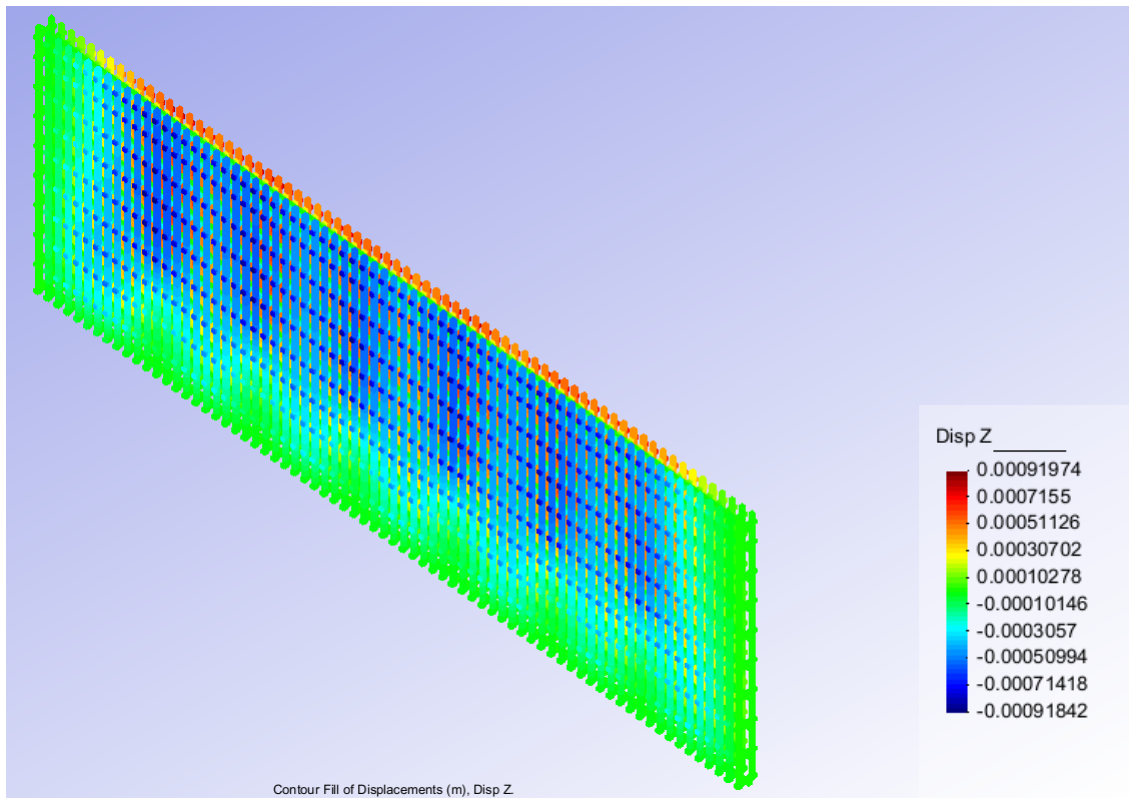
Desplazamientos:



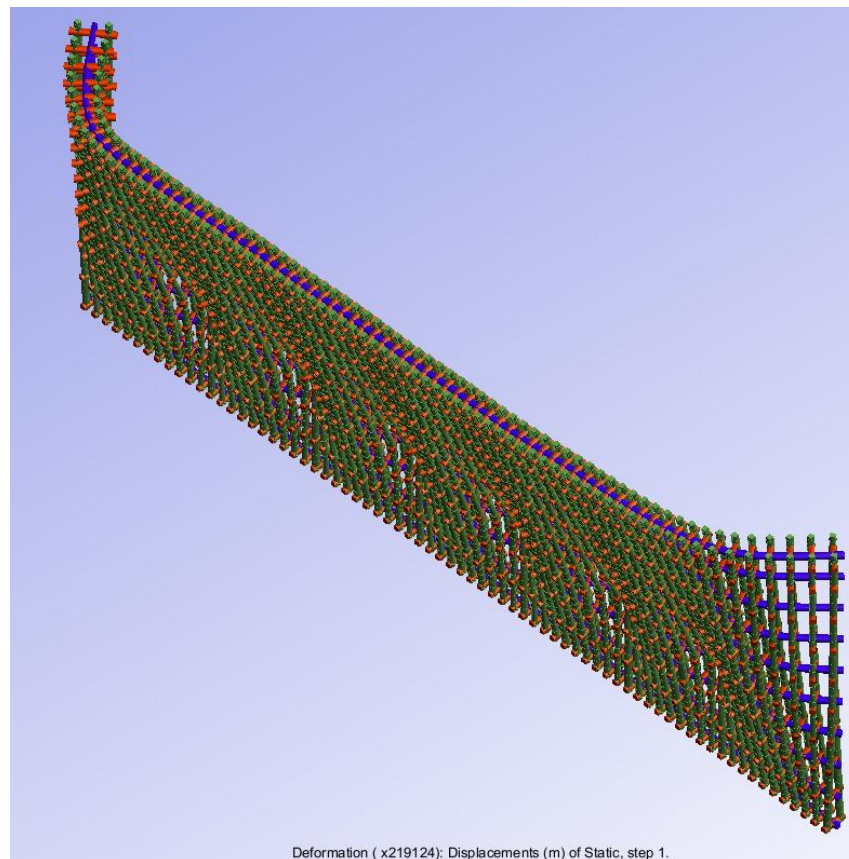
Representación del desplazamiento respecto al eje X (m)



Representación del desplazamiento respecto al eje Y (m)



Representación del desplazamiento respecto al eje Z (m)



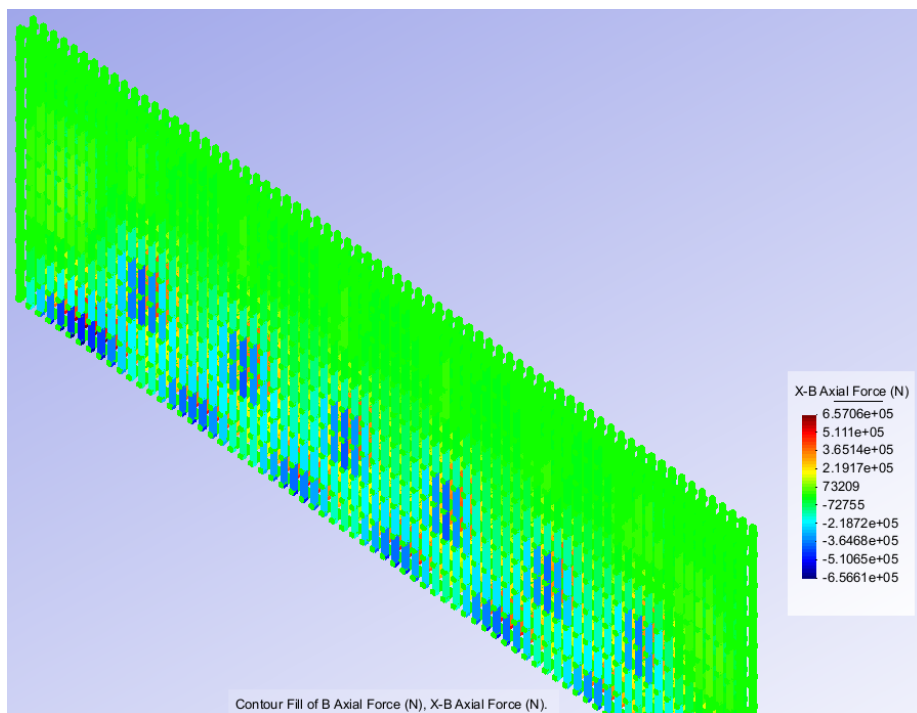
Representación del desplazamiento general de la compuerta

Respecto a los desplazamientos que sufre la compuerta podemos ver que se pueden considerar despreciables debido a la grandes dimensiones de la compuerta, los hacen insignificables. Se aprecia que los mayores desplazamientos se dan en la parte superior y central de la compuerta, esto es lógico ya que es la zona que está más alejada de cualquier apoyo. Los máximos desplazamientos se sufren respecto al eje X debido a que las cargas están situadas en dicha dirección, pero en ningún momento llegan a sobrepasar los 18 mm de desplazamiento. Teniendo en cuenta que trabajamos con una estructura de 36.000 mm de longitud es un valor aceptable.

Viendo los desplazamientos también podemos prever cómo serán algunas de las cargas, por ejemplo vemos que en la zona interior los refuerzos verticales se acortan y por el exterior se alargan, esto nos indica que éstos en el interior sufrirán cargas de compresión y por el exterior de tracción.

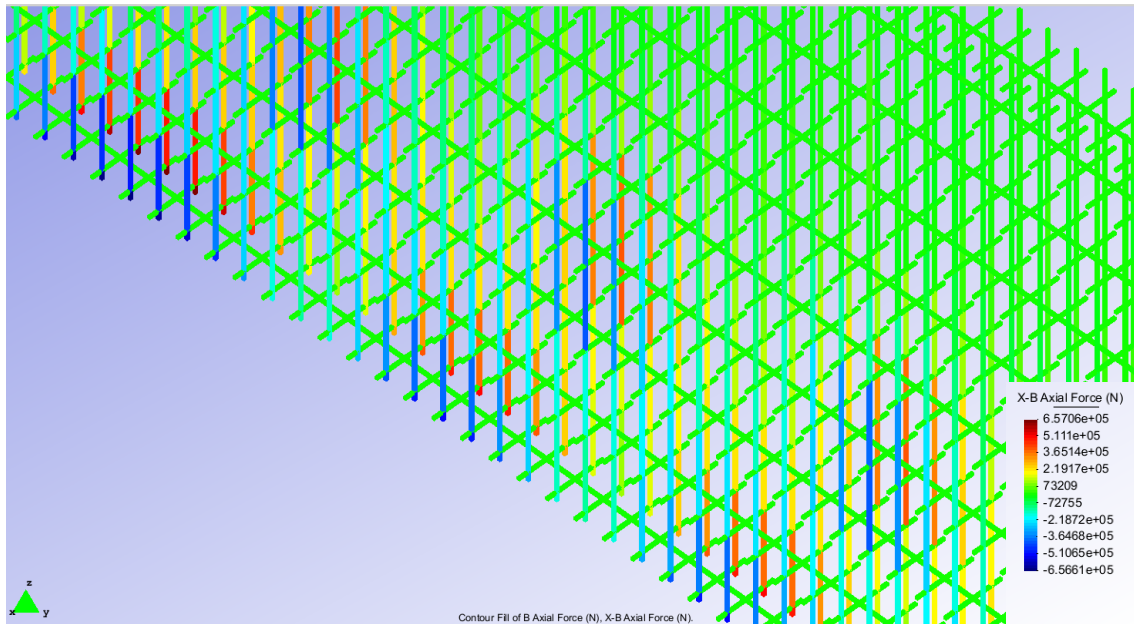
Tensiones cortantes :

Respecto al eje X



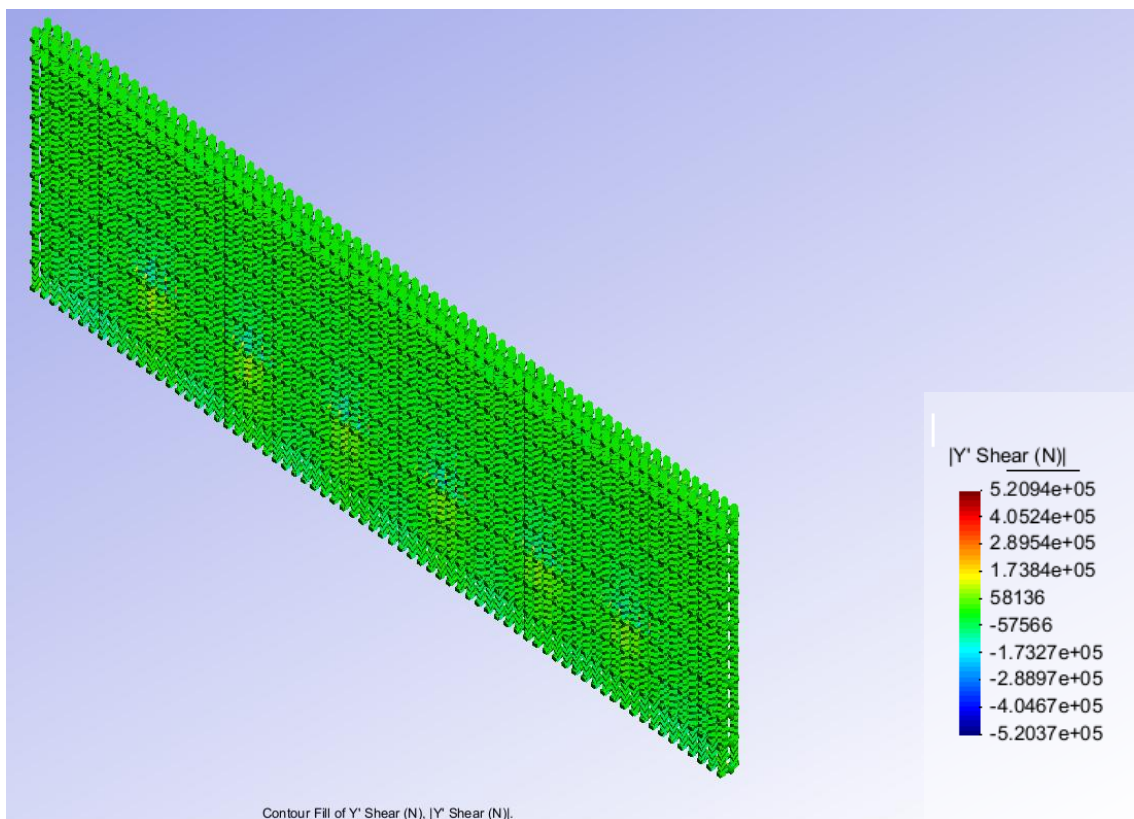
Representación de las tensiones respecto del eje X de la compuerta

Se puede ver que las tensiones que sufre la estructura se concentran preferencialmente en la zona donde coinciden con los apoyos inferiores y en las zonas donde se sitúan los apoyos internos. Esta situación es lógica ya que en estos puntos es donde se transmiten las cargas debidas a la columna de agua a la estructura general del dique.



Detalle de las tensiones respecto al eje X en la zona de los apoyos

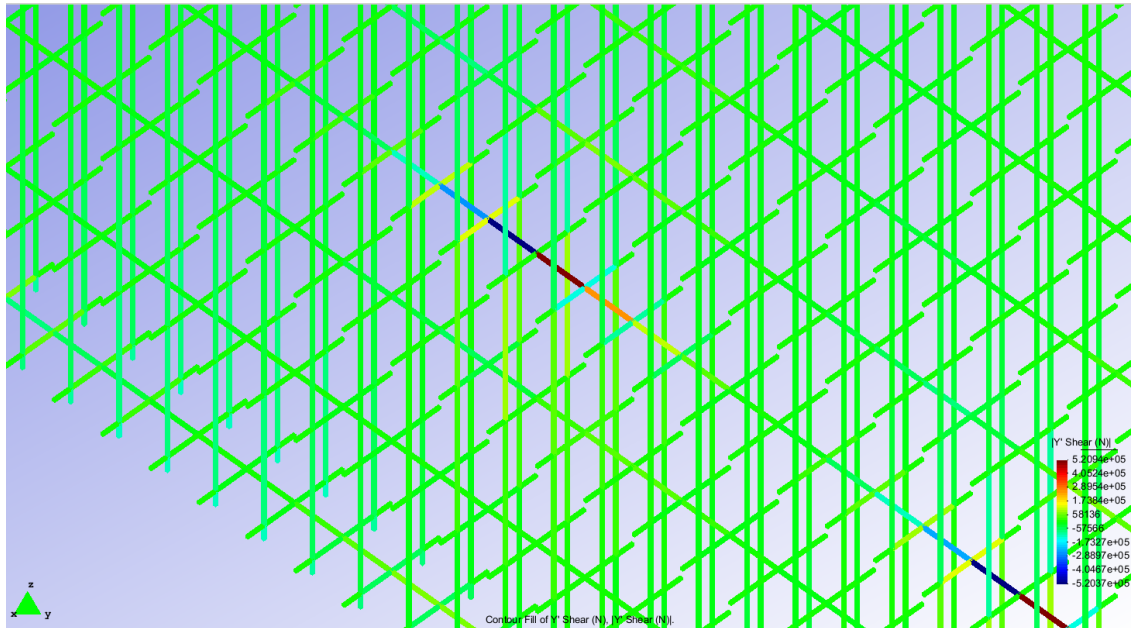
Respecto al eje Y:



Representación de las tensiones respecto del eje Y de la compuerta

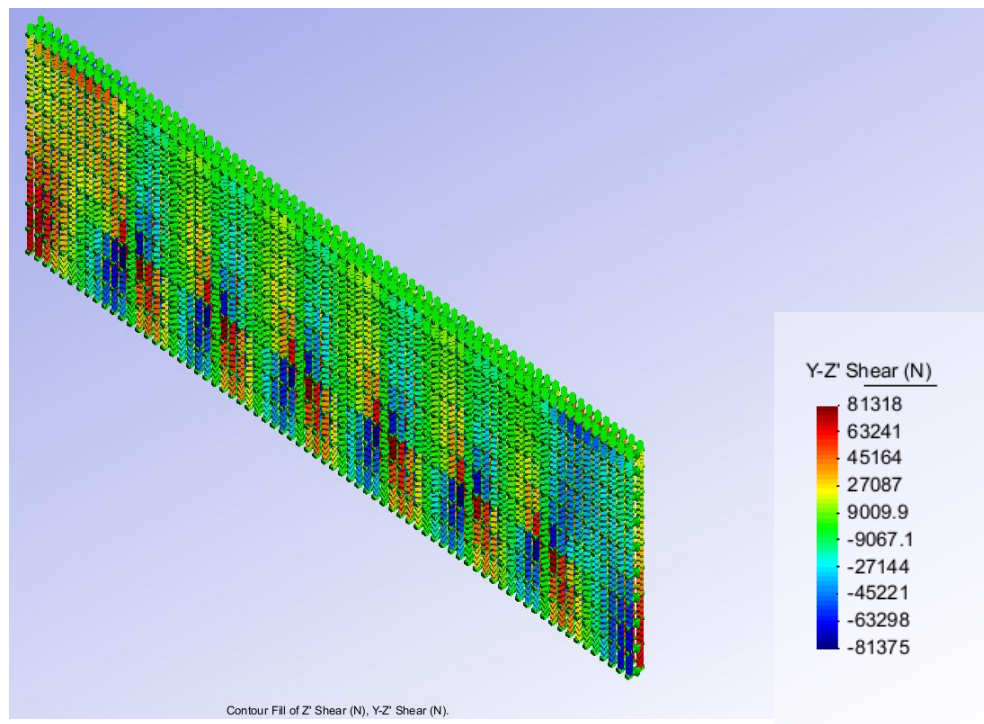
Como era de esperar respecto al eje X de la compuerta los esfuerzos son prácticamente nulos y solo vienen dados por las deformaciones que sufre la compuerta debido a sus dimensiones,

hay una ligera concentración de éstos en la zona de los apoyos internos pero dicha situación estaba prevista.



Detalle de las tensiones respecto al eje Y en la zona de los apoyos

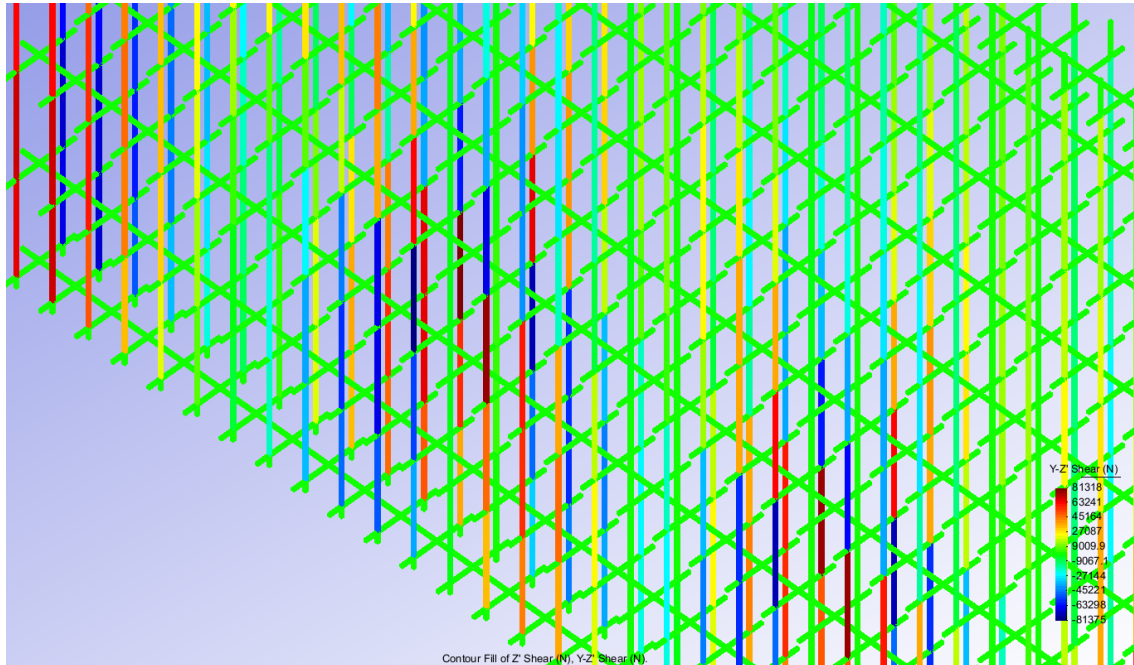
Respecto al eje Z:



Representación de las tensiones respecto del eje Z de la compuerta

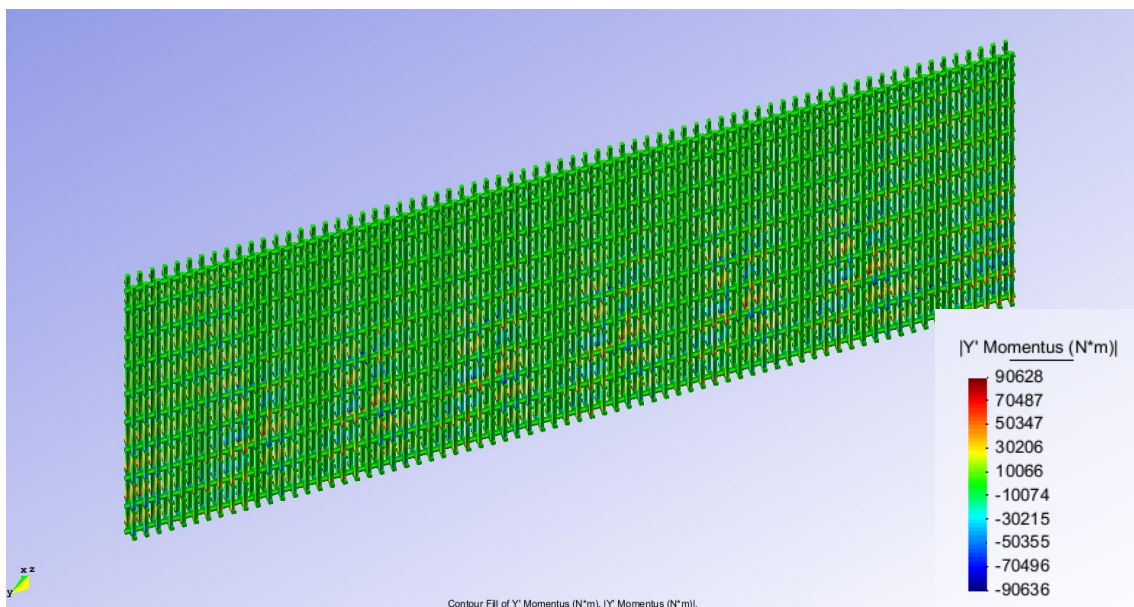
En la imagen se puede apreciar la carga respecto al eje vertical, prácticamente dicha carga viene dada por el peso propio del conjunto, se puede apreciar como en la zona más alta existe

una carga inferior que en la zona más baja, esto es lógico ya que contra más abajo más peso deberán soportar. Además se aprecia el cambio de carga signo en la carga que se produce en la zona de los apoyos, dichos cambios son prácticamente iguales que los definidos mediante métodos manuales.

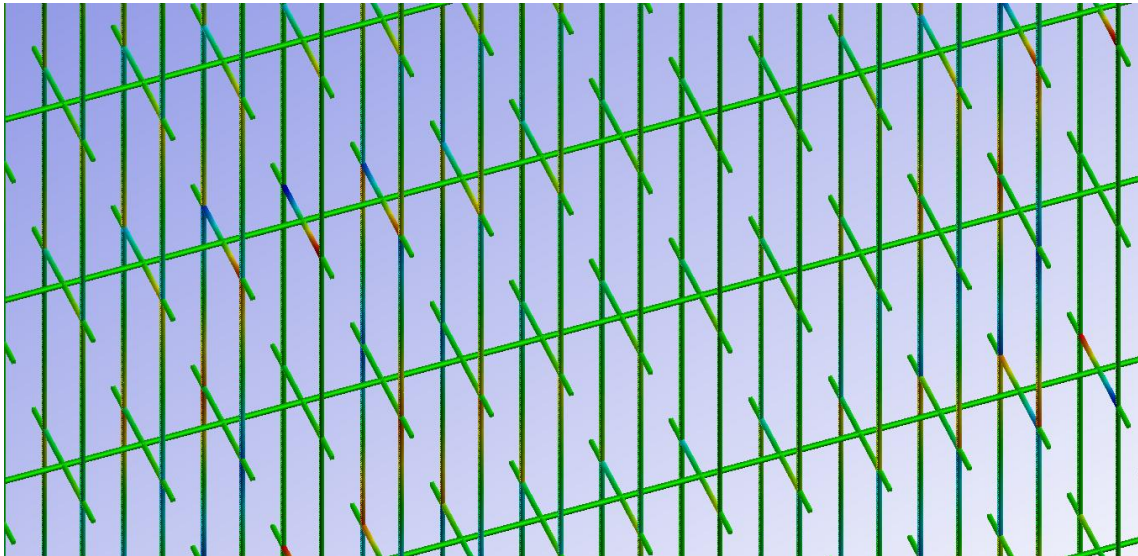


Detalle de los tensiones respecto al eje Z en la zona de los apoyos

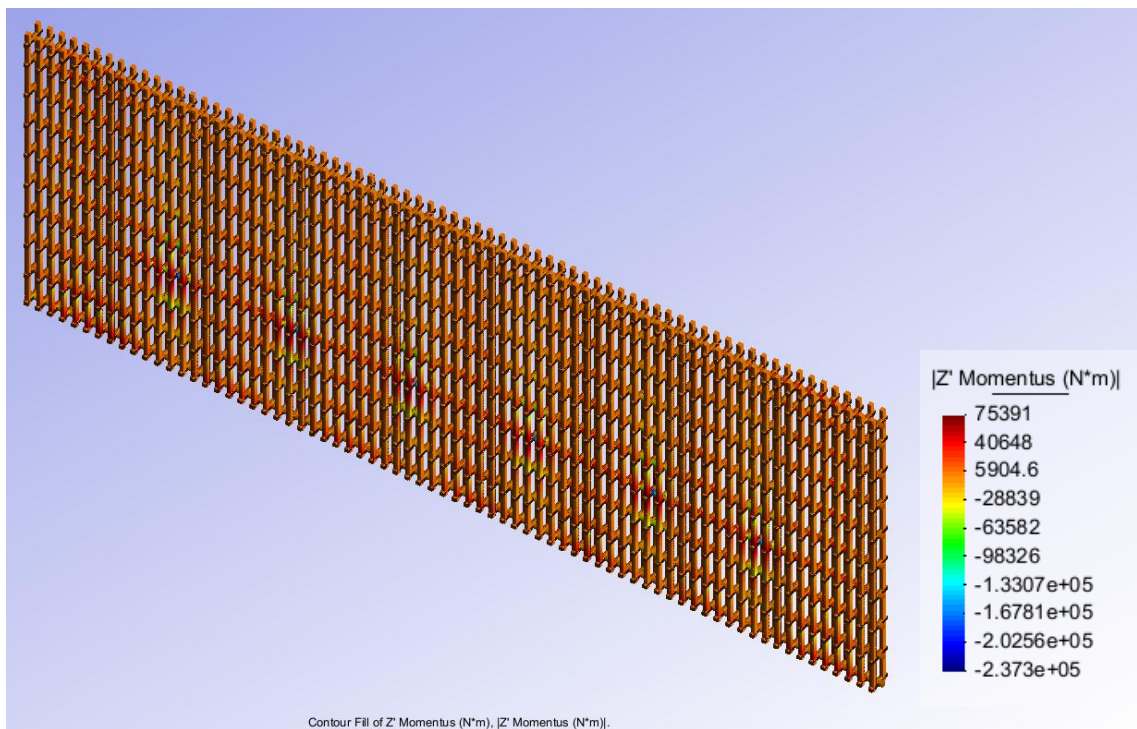
Momentos flectores :



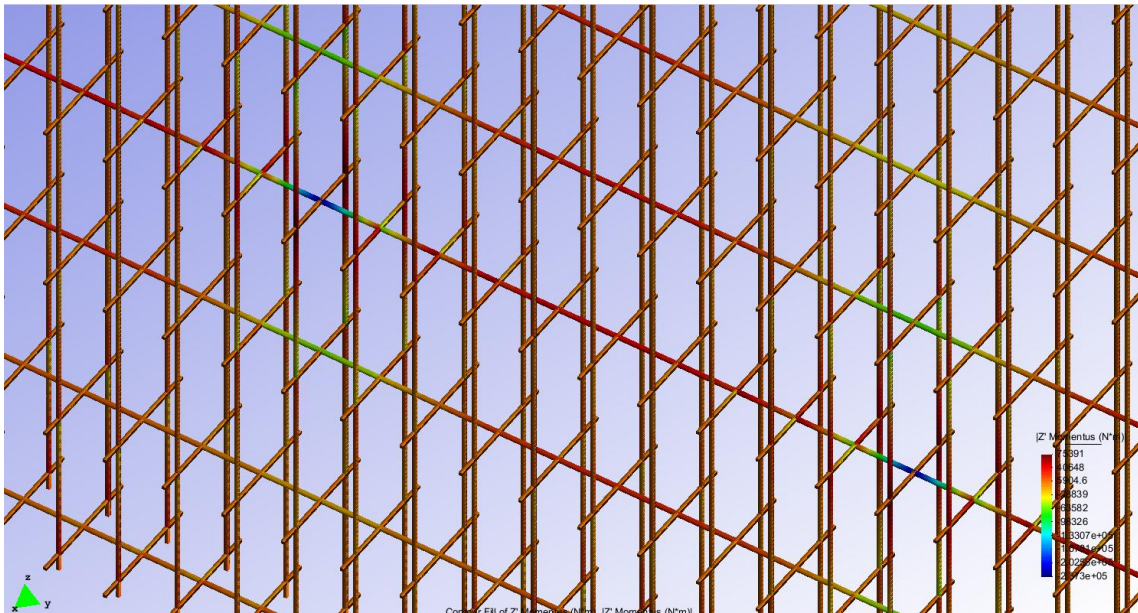
Representación de los momentos respecto del eje Y de la compuerta



Detalle de los momentos respecto del eje Y en la zona de los apoyos



Representación de los momentos respecto del eje Z de la compuerta



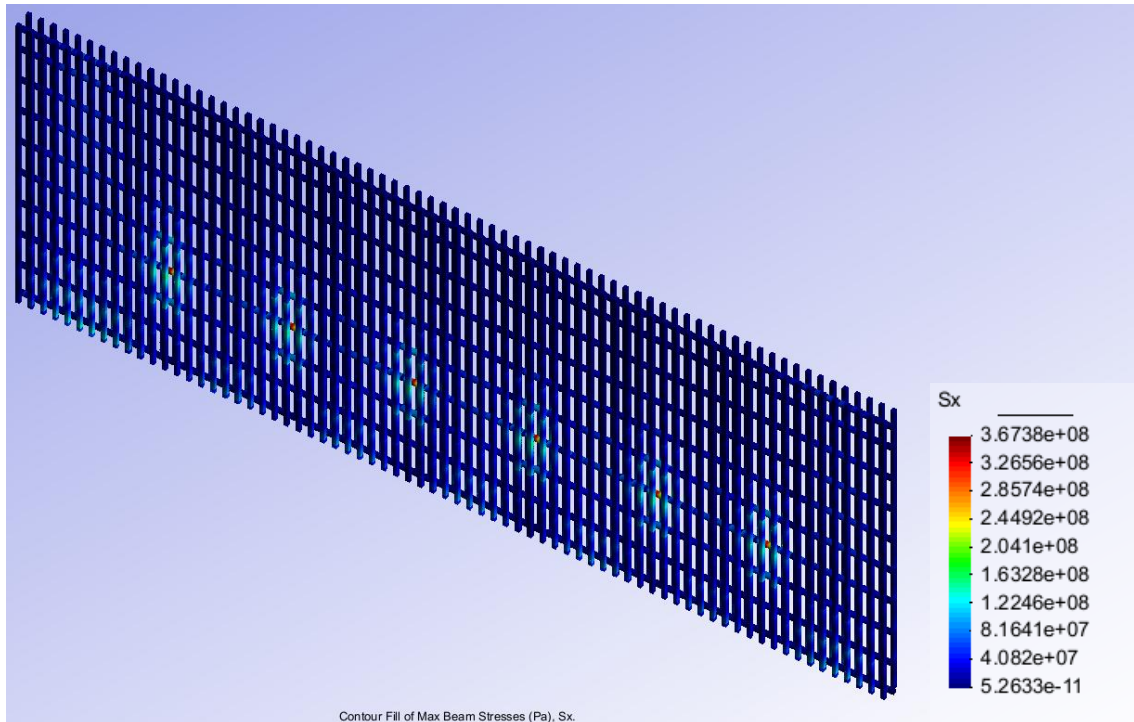
Detalle de los momentos respecto del eje Z en la zona de los apoyos

En las imágenes se aprecian los dos momentos principales que afectan a la compuerta, por una parte el momento flector respecto el eje Y, este es el que provoca que la compuerta se flexione verticalmente, en general el momento es similar en todos los puntos de la compuerta excepto en los apoyos internos que son los puntos donde se denota que los momentos son superiores, esto es un fenómeno lógico ya que en estos puntos la compuerta transmite la carga hacia el dique.

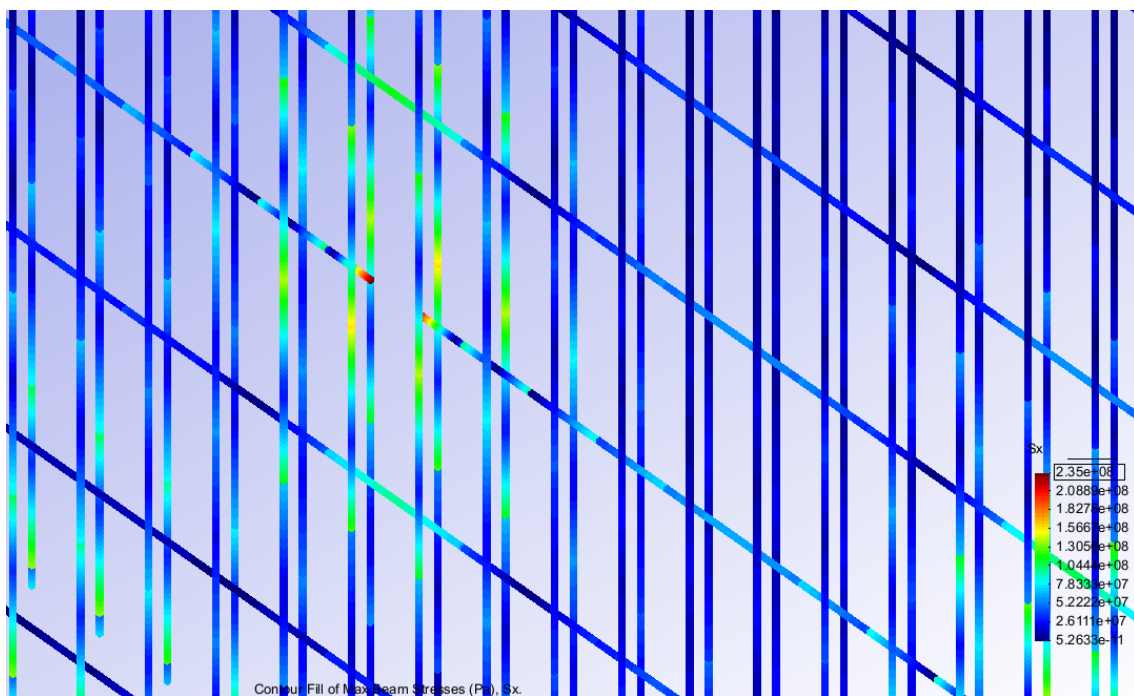
De la misma forma en los momentos respecto el eje Z, la compuerta tiene los momentos repartidos equitativamente por todo el conjunto teniendo las zonas de máximos momentos aquellas próximas a los apoyos internos.

Esfuerzo normal máximo:

Ya se han comentado cuales son las tensiones y momentos principales que afectan a toda la compuerta; en esta imagen lo que se aprecia es el diagrama de esfuerzos normales que afectan a todos los elementos de refuerzo del conjunto. Podemos ver que las mayor partes del conjunto tienen unos esfuerzos bastante bajos, las zonas que tienen unos esfuerzos más elevados son la zona de los puntos de apoyo del conjunto, de la misma forma se notan ciertas zonas de esfuerzo en la parte baja de la compuerta las cuales son debidas a los apoyos inferiores de la misma.



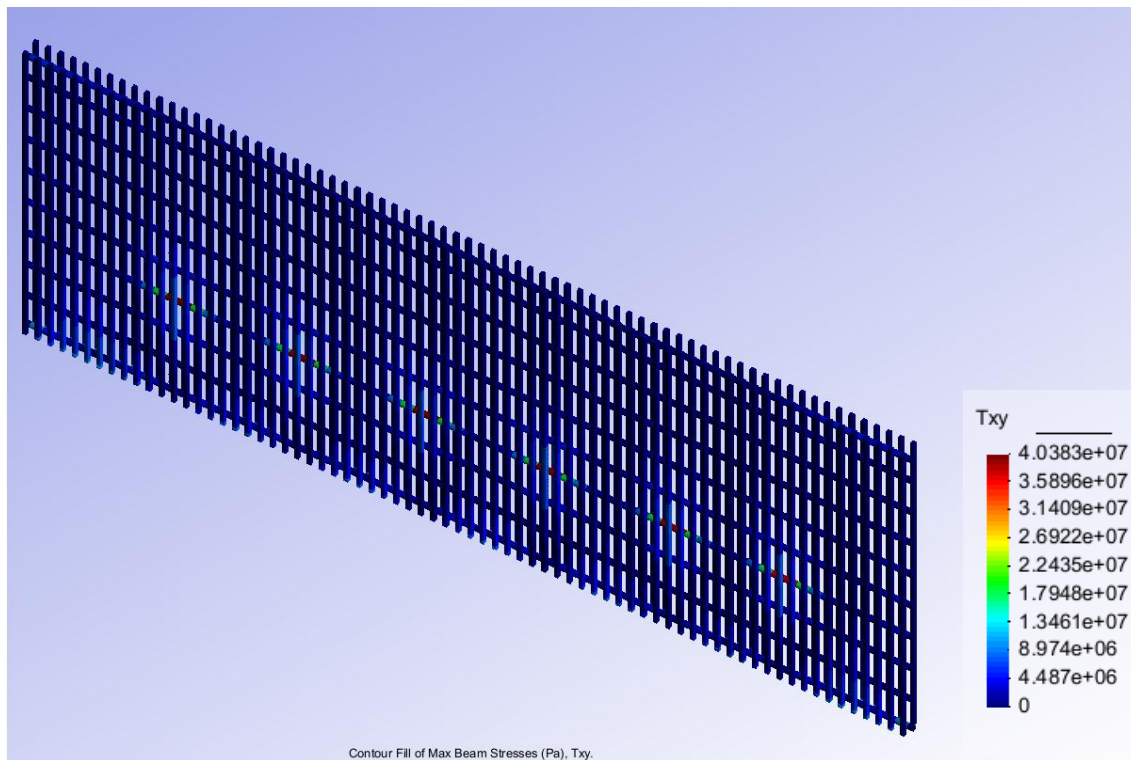
Representación del esfuerzo normal máximo



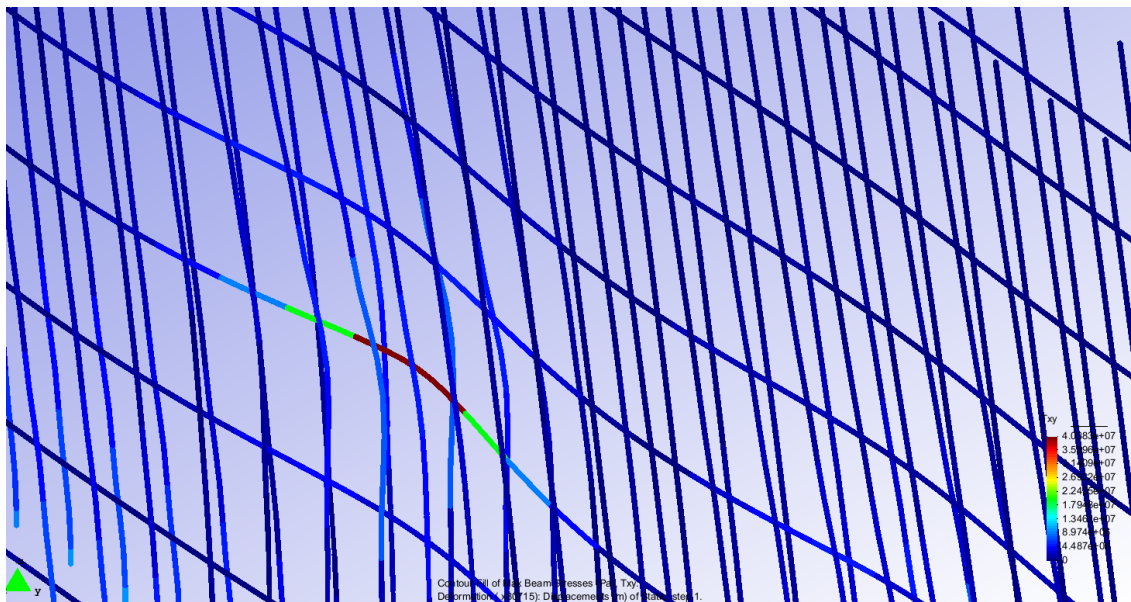
Detalle de los esfuerzos normales en la zona de los apoyos

Cuando se realiza el zoom en la zona de los apoyos y se aplica como valor máximo el de la tensión máxima del acero, desaparece una zona de las barras, esto nos indica que este tramo está trabajando por encima de su valor máximo. Esto es un dato falseado ya que en esta simulación los elementos de apoyo se han posicionado como elementos puntuales, esto no es así si no que la carga del apoyo se transmite a una superficie con una cierta área la cual es capaz de soportar las cargas en dicho punto.

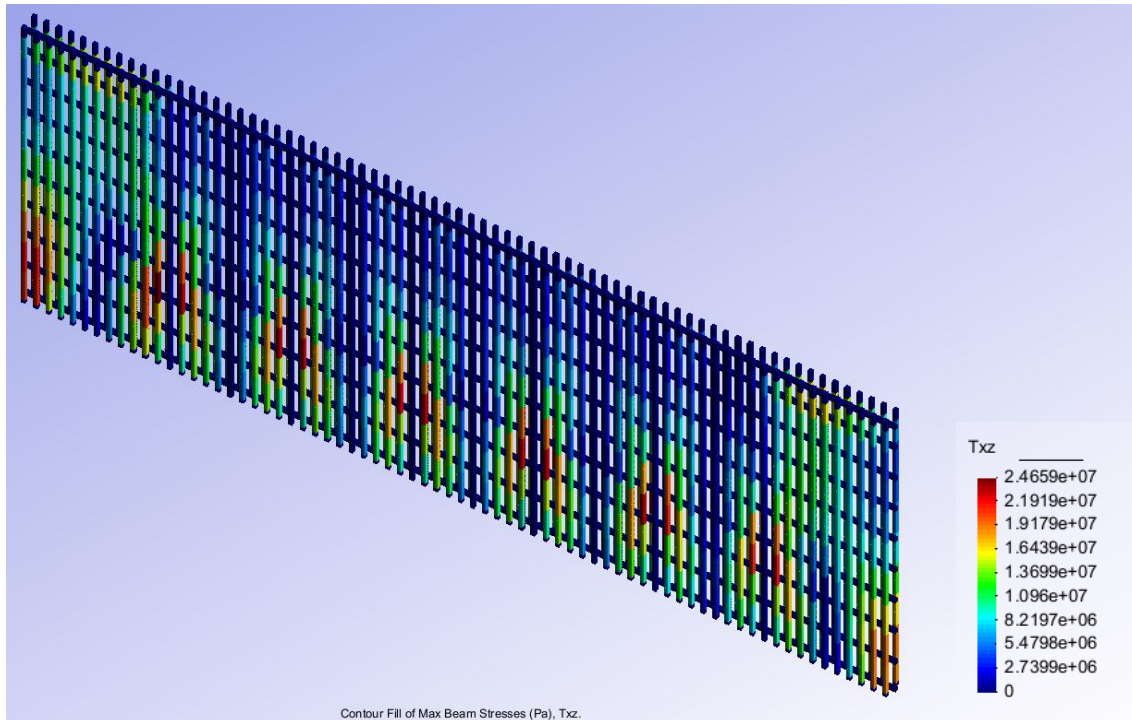
Momento flector máximo:



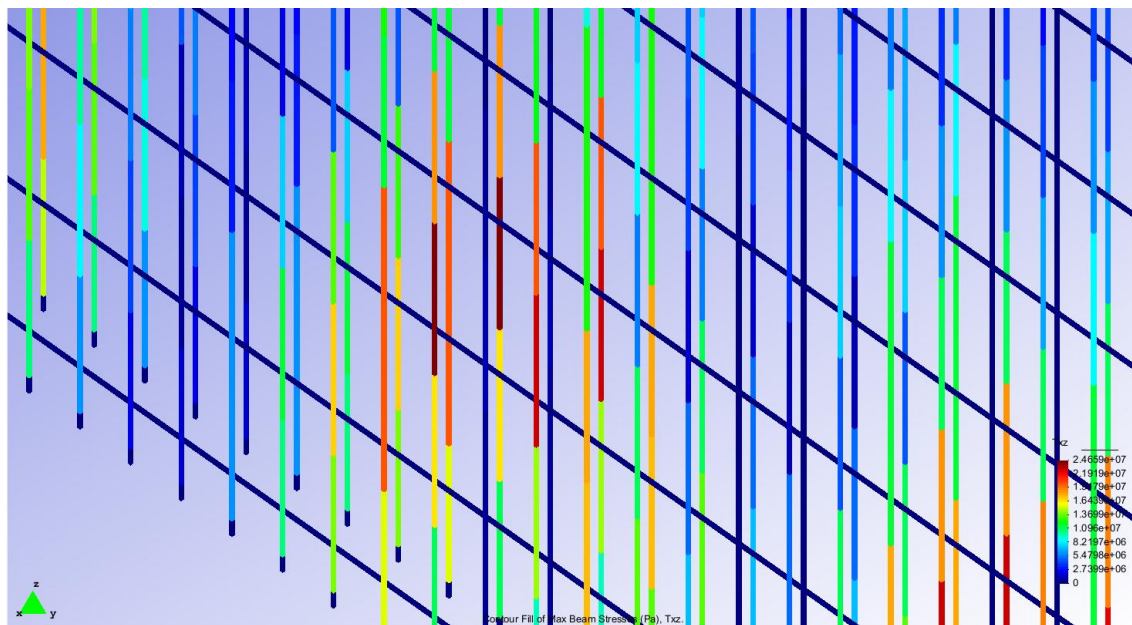
Representación del momento flector máximo en el plano XY



Detalle compuesto del momento flector máximo en el plano XY en la zona del apoyo interior con una simulación de la deformación en dicha zona



Representación del momento flector máximo en el plano XZ



Detalle del momento flector máximo en el plano XZ en la zona del apoyo

En las imágenes anteriores se pueden ver los esfuerzos debidos a los momentos en los distintos planos, es de remarcar que no aparece el momento en el plano ZY debido que en este plano los momentos existentes vienen dado por el propio peso de la compuerta y estos son relativamente pequeños en comparación del resto.

Respecto a los momentos en los otros planos, el momento flector respecto al plano XY son bastante similares a lo largo de toda la compuerta debido a que las líneas de presión son

continuas horizontalmente y por lo tanto los momentos se equilibran en todo momento. Por el contrario como se puede apreciar en el plano XZ es donde se aprecian realmente los momentos que afectan a la compuerta, teniendo sus máximos picos en la zona de los laterales inferiores y las zonas de los apoyos internos.

En general el cálculo mediante el programa informático es coherente con lo que se ha planteado en el cálculo manual, las pequeñas diferencias vienen dadas al realizar una aproximación en el programa de los elementos finitos y considerar únicamente la parte del bloque de la compuerta sin hacer el análisis del apoyo inferior. Aun así los esfuerzos máximos que aparecen en la compuerta son similares a los evaluados mediante métodos manuales y por lo tanto todo el conjunto de la compuerta se comporta de forma adecuada y prevista.

Diseño y cálculo de los elementos de apoyo y elevación de la compuerta

En dicho apartado lo que se realizará es un diseño de los elementos de apoyo, tanto internos como inferiores; y los componentes de los medios de elevación de la compuerta. A la hora de realizar el cálculo de estos elementos se debe tener una especial atención, ya que son los elementos que unen la estructura al dique y por lo tanto son los que transmitirán el conjunto de las acciones del sistema.

APOYOS INTERNOS:

Como ya se ha comentado anteriormente la compuerta sufre la presión externa debido a la columna de agua en el costado exterior de la misma, dicha presión supone un esfuerzo muy elevado, si a eso le añadimos las dimensiones propias de la compuerta aparecen unos momentos flectores excesivamente elevados y que provocarían unas tensiones inadmisibles para los materiales que se suelen utilizar en este tipo de construcciones.

Es por ello que se decidió, imitando a diques ya existentes, construir una serie de refuerzos interiores que trasmitiesen dicha fuerza al conjunto del dique para así reducir las tensiones generadas en los materiales de la compuerta. La elección de la tipología de dichos apoyos se ha basado en el estudio del comportamiento de los mismos y de las cargas que iban a recibir dependiendo de la geometría propia.

Después de un estudio de imágenes de otros diques a nivel mundial, se optó por realizar un refuerzo múltiple a lo largo de toda la manga de la compuerta a una cierta profundidad del nivel del mar. El refuerzo está formado por un conjunto de 5 apoyos los cuales en su posición de trabajo se apoya, formando un ángulo de 45° con la horizontal sobre un refuerzo estructural de la compuerta que recorre toda su manga.

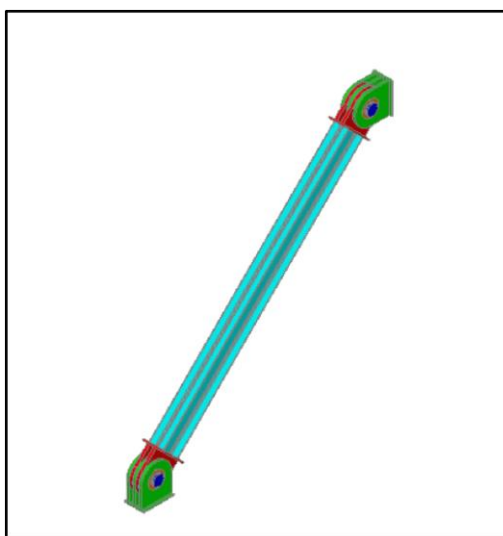


Imagen CAD del apoyo interno

El cálculo de los apoyos internos se ha dividido en 4 partes distintas:

1. Elementos de apoyo:
 - a. Apoyo compuerta
 - b. Apoyo viga
 - c. Apoyo dique
2. Pasador
3. Cojinetes
4. Viga

Además de el análisis estructural de dichos elementos se ha hecho un pequeño análisis constructivo de distintos aspectos que se deberían tener en cuenta a la hora de realizar el proyecto de forma real, como por ejemplo que tipo de material se utiliza para los cojinetes que deban trabajar en dichas condiciones, poner aros que eviten el movimiento axial del pasador, etc.

1. Elementos de apoyo:

Los elementos de apoyo son los encargados transmitir las cargas recibidas a en una superficie plana al pasador. En un principio se evaluó la posibilidad de realizar dichos elementos mediante la soldadura de planchas normalizadas de acero al carbono, pero debido a los espesores que se requerían podrían surgir problemas con las soldaduras, ya que se hacían demasiado complejas debido a los espesores. Es por ello que se optó por la fabricación mediante fundición en moldes prefabricados, dicho sistema nos permite generar conjuntos con estructura homogénea y con los elementos constructivos necesarios para la conexión con el resto de la estructura.

- Apoyo compuerta /apoyo en el dique: El apoyo de la compuerta es el que transmite la fuerza recibida de la compuerta a la estructura de apoyo interno, por el contrario el apoyo del dique, es el encargado de transmitir la carga del apoyo a la estructura del dique. Debido a las elevadas cargas con las que se están trabajando en dicho proyecto se deberían realizar cálculos de los anclajes de dichos elementos con el dique y qué tipo de cimentación sería la más adecuada; pero eso es materia de Ingeniería Civil y por lo tanto no se tienen los conocimientos y tampoco es competencia de dicho estudio.

A la hora de decidir el diseño de dichos elementos se evaluaron distintas posibilidades en cuanto a su geometría; la parte más importante fue la elección de cuantos anclajes disponer en cada uno de los apoyos. Los anclajes influyen en la tensión por aplastamiento que se le aplicará al pasador, si genera un apoyo con pocos anclajes el pasador sufrirá grandes tensiones, por el contrario si se ponen un gran número de anclajes el pasador tendrá un menor esfuerzo. Se optó por la opción de situar 3 anclajes por apoyo para que transmitiesen la carga al pasador sin generar un excesivo esfuerzo.

| CALCULO SUJECIÓN COMPUERTA | | |
|----------------------------|---------------|-----------------------|
| σ_{\max} acero | 27,50 | KN/cm ² |
| coef. Seg. | 2,00 | |
| σ_{\max} aplast | 13,75 | KN/cm ² |
| APLASTAMIENTO | | |
| A aplasta | 268,39 | cm/2 |
| nº elementos | 3 | |
| espesor | 5,00 | cm |
| Longitud | 15,00 | cm |
| Área final | 450,00 | cm² |

Como se puede apreciar en la tabla anterior se ha escogido un Coeficiente de seguridad con un valor de 2, el cual hace que por cada uno de los apoyos situados a lo largo de la manga de la compuerta se necesite un área de 268,39 cm². Nosotros por nuestra geometría constructiva nos sale un valor de 450 cm², lo que nos genera un margen de seguridad adicional antela posible pérdida de materia causada por la corrosión del agua salada.

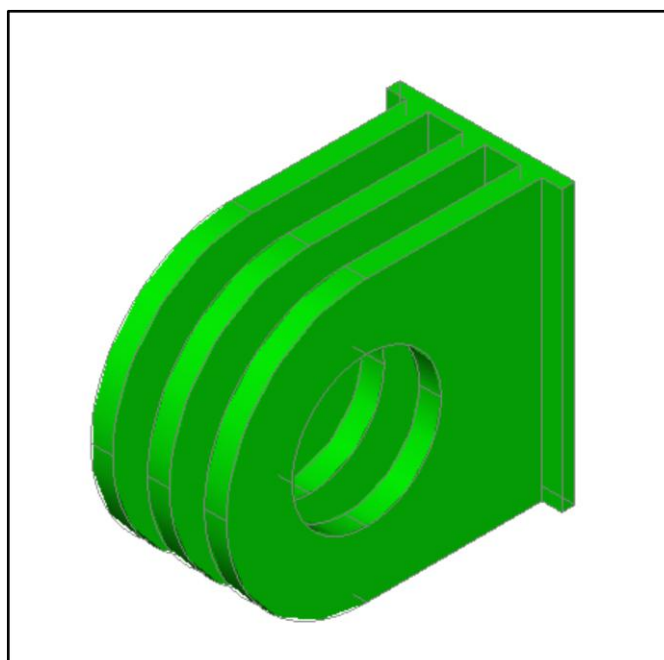


Imagen CAD sujeción compuerta apoyo interno

- Apoyo viga: Este elemento transmite los esfuerzos que le llegan a través del pasador a la viga de apoyo interna, se mantienen las mismas consideraciones que se tenían en el caso anterior de los apoyos de la compuerta y el dique. Con dichas premisas se han obtenido los siguientes valores:

| CALCULO SUJECIÓN APOYO | | |
|------------------------|---------------|-----------------------|
| σ_{\max} acero | 27,50 | KN/cm ² |
| coef. Seg. | 2,00 | |
| σ_{\max} aplast | 13,75 | KN/cm ² |
| APLASTAMIENTO | | |
| A aplasta | 268,39 | cm/2 |
| nº elementos | 2 | |
| espesor | 6,00 | cm |
| Longitud | 15,00 | cm |
| Área final | 360,00 | cm² |

Igual que sucedía en el caso anterior se ha escogido un coeficiente de seguridad de valor 2 con el cual nos sale un área de 360 cm². El dato que debemos tener en cuenta es que en este caso solo tendremos dos anclajes y por ello el área de dichos elementos deberá ser ligeramente superior que en el caso anterior, para ello se aumentará el espesor de dichos elementos.

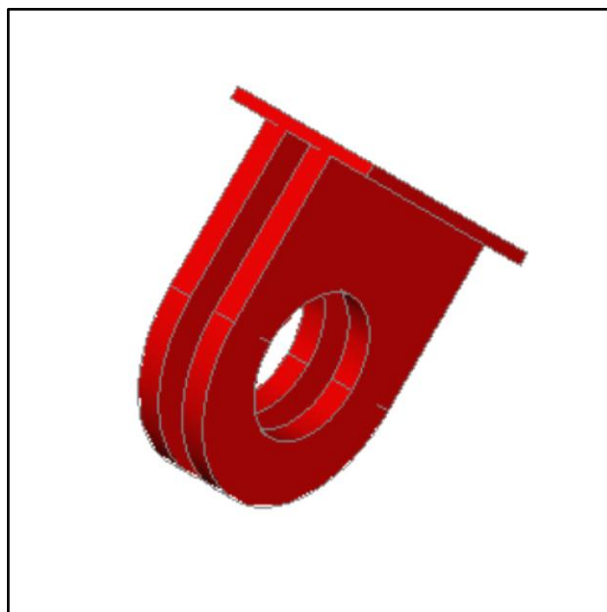


Imagen CAD sujeción viga apoyo interno

2. Pasador:

El pasador es uno de los elementos más importantes en todo el conjunto de los apoyos, ya que es el encargado de generar el cambio de dirección de la fuerza a través de su masa. Lo primero que se deberá tener en cuenta a la hora de realizar su diseño es que la superficie externa deberá ser lo más lisa posible y que dicha superficie deberá mantenerse así incluso en las condiciones más adversas. Es por ello que en este elemento se trabajará con

acero inoxidable, ya que es un material que aguanta de forma adecuada los ambientes salinos sin sufrir alteraciones excesivas.

Una vez que se ha decidido el material de su composición se deberá determinar su geometría, su longitud vendrá dada por la distancia suficiente para abarcar todos los anclajes más una cierta distancia adicional que permita situar los aros retenedores, los cuales evitaren que el eje se desplace axialmente debido a los movimientos propios del conjunto. La otra dimensión importante de dicho elemento es su radio, dicha dimensión vendrá dada por el esfuerzo cortante que deba soportar dicho elemento.

Para realizar el cálculo del radio mínimo necesario para que dicho elemento no sufra un colapso del material se han utilizado como en los casos anteriores las formulas de los esfuerzos por aplastamiento y el cortante en superficies planas, con ello se ha obtenido los siguientes valores.

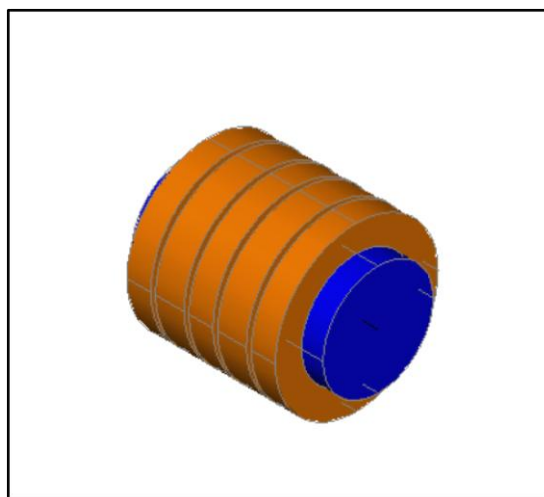


Imagen CAD del pasador y cojinetes

| CALCULO CORTANTE DEL PASADOR | |
|------------------------------|--------------------------|
| σ_{\max} acero | 27,50 KN/cm ² |
| coef. Seg. | 2,00 |
| σ_{\max} aplast | 13,75 KN/cm ² |
| σ_{\max} cortante | 9,17 KN/cm ³ |
| APLASTAMIENTO | |
| A aplasta | 268,39 cm/2 |
| Φ aplast | 22,37 cm |
| CORTANTE | |
| A cortante | 402,58 cm/2 |

| | |
|-----------------|----------|
| Φ cortante | 11,32 cm |
| Φ elección | 23,00 cm |

Como se puede ver en la tabla anterior, el radio mínimo necesario para que dicho elemento soporte la tensión que se le aplica con un cierto factor de seguridad es de 11.32 cm, en dicho proyecto se ha seleccionado un radio de 11.5 cm debido a que es más sencillo a nivel constructivo encontrar materiales de dicha dimensión que no con unas dimensiones muy concretas.

3. Cojinetes:

El diseño de este elemento es uno de los problemas más complicados, junto al pasador, de este conjunto. Un cojinete es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y el elemento en el cual se encuentra apoyado. En la mayoría de aplicaciones industriales estos mecanismos están contruidos mediante materiales metálicos ya que son los que suelen soportar de una forma más adecuada los distintos esfuerzos que puedan aparecer en los ejes. Pero en éste proyecto surge un problema realmente grave y de difícil solución los cojinetes estarán sumergidos durante ciertos períodos en agua de mar, lo cual podría dañarlos de una forma muy importante. Debido a este problema se plantearon varias opciones para la elección de dichos elementos:

- Cojinetes estancos: Son unos tipos de cojinetes desarrollados para aplicaciones especiales donde debido a las condiciones de trabajo podrían sufrir ataques químicos y físicos que redujesen sus propiedades mecánicas. Su construcción es realmente compleja porque además de los elementos usuales en un cojinete debe haber una serie de retenes entre ambas caras del mismo que eviten que pueda introducirse líquido dentro del propio mecanismo. La construcción de este tipo de cojinetes para las dimensiones en las que estamos trabajando supondría un coste realmente excesivo y un mantenimiento demasiado elevado lo que encarecería la instalación en su conjunto.
- Cojinetes de materiales metálicos alternativos: Otra alternativa que se barajó a la hora de la elección del modelo constructivo de los cojinetes fue la posibilidad de utilizar, como en los pasadores materiales que soportasen de una forma adecuada la corrosión debida al medio salado. Se estudió la posibilidad de aleaciones de acero inoxidable el problema es que no se encontró ninguna casa que hiciera elementos de dichos diámetros que pudieran soportar las cargas tan elevadas. Es por ello que nuevamente se descarto ésta opción.
- Cojinetes materiales sintéticos: En la actualidad han aparecido una gran cantidad de materiales sintéticos los cuales tienen unas propiedades extraordinarias para según qué aplicaciones. En este caso, se ha encontrado un producto fabricado mediante

materiales sintéticos el cual es capaz de satisfacer nuestras necesidades para dicho componente. El material elegido se denomina MARITEX.

MARITEXA es un compuesto sintético obtenido bajo procedimientos de alta presión y temperatura a base de resinas fenólicas, lubricantes sólidos y fibras de refuerzo altamente entrelazadas. Algunas de las características que hacen de este material idóneo para nuestra aplicación son las siguientes:

- Reduce el desgaste de los ejes hasta en un 90%
- Alta estabilidad dimensional, tanto en seco o sumergido, igual que con variaciones de temperatura.
- Alta tolerancia a la suciedad y abrasivos.
- Nula conductividad eléctrica y baja conductividad térmica.
- Alta capacidad de carga y alta tolerancia a los choques.
- Bajo índice de rozamiento.
- Fácil mecanización.
- Resistente a alcoholes, hidrocarburos, parafinas, petróleo y agua marina.

Después de hacer un estudio de los materiales queda demostrado que el material sintético es una alternativa totalmente viable a los cojinetes metálicos habituales en medios corrosivos. Para el diseño de la forma de los cojinetes nos basaremos en las dimensiones de los elementos de apoyo y del pasador calculado anteriormente. El radio del pasador nos proporcionará el diámetro interior del cojinete, para conocer el diámetro exterior será necesario conocer la carga que deberá soportar dicho mecanismo. La distancia axial de los mismos vendrá dada por las dimensiones de los apoyos de la viga, la compuerta y el dique.

El cálculo de dichos elementos viene dado en la siguiente tabla :

| CÁLCULO DEL COJINTE | | | |
|----------------------------------|---------|-----|--------------------------|
| MATERIAL | MARITEX | | |
| $\sigma_{\text{max tensión}}$ | 45,00 | MPa | 4,50 KN/cm ² |
| $\sigma_{\text{max compresión}}$ | 100,00 | MPa | 10,00 KN/cm ² |
| $\sigma_{\text{max cortante}}$ | 80,00 | MPa | 8,00 KN/cm ² |
| coef seguridad | 1,45 | | |
| $\sigma_{\text{max admisible}}$ | 68,97 | MPa | 6,89 KN/cm ² |
| T med. | | | 6,90 KN/cm ² |
| Área | | | 534,83 cm ² |

| | | |
|----------------------------|--------|-----|
| nº elementos | 2 | |
| espesor | 6,00 | cm |
| radio | 11,50 | cm |
| Área final | 552,00 | cm2 |
| | | |
| nº elementos | 3 | |
| espesor | 5,00 | cm |
| longitud | 11,18 | cm |
| área final | 670,97 | cm2 |
| | | |
| Dimensiones finales | | |
| | | |
| radio interior | 11,50 | cm |
| radio exterior | 17,00 | cm |
| espesor 1 | 6,00 | cm |
| espesor 2 | 5,00 | cm |

APOYOS INFERIORES:

Como ya se ha comentado en este proyecto la compuerta se mueve mediante un elemento pivotante situado en la parte inferior, es decir una bisagra. Esta bisagra deberá de poder soportar los momentos ejercidos a la hora de elevar y hundir la compuerta y a su vez soportar los esfuerzos generados por el peso propio de la compuerta en su posición estática. Debido a esto se debe de realizar un cálculo sobre cuál serán las dimensiones correctas de los elementos que permitan soportar los esfuerzos de forma adecuada.

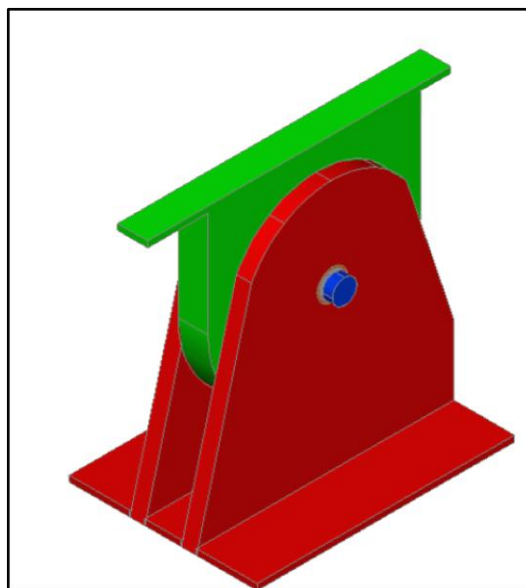


Imagen CAD bisagra inferior

Para realizar el cálculo impondremos unas condiciones iniciales indicadas en la siguiente tabla:

| | | | |
|----------------------------|---------|-----|--------------------------|
| Peso compuerta | | | 5858,244 KN |
| Número apoyos | | | 13 |
| σ_{\max} acero | | | 27,50 KN/cm ² |
| coef. Seg. | | | 4,00 |
| σ_{\max} aplast | | | 6,88 KN/cm ² |
| σ_{\max} cortante | | | 4,58 KN/cm ² |
| MATERIAL | MARITEX | | |
| σ_{\max} tensión | 45,00 | MPa | 4,50 KN/cm ² |
| σ_{\max} compresión | 100,00 | MPa | 10,00 KN/cm ² |
| σ_{\max} cortante | 80,00 | MPa | 8,00 KN/cm ² |
| coef seguridad | 1,45 | | |
| σ_{\max} admisible | 68,97 | MPa | 6,89 KN/cm ² |

El cálculo de la bisagra inferior se divide en 3 apartados los cuales están relacionados por sus dimensiones que afectaran a los esfuerzos que deban soportar.

5. Apoyo del dique
6. Apoyo de la compuerta
7. Pasador y cojinetes

1. Apoyos del dique

Son los elementos que transmitirán las cargas de la compuerta a los cimientos del dique, es por ello que se deberán de calcular con un margen de seguridad que nos permita asegurara que aunque se deterioren con el paso del tiempo sigan manteniendo sus propiedades mecánicas.

El cálculo de sus dimensiones y esfuerzos aparecen en la tabla siguiente:

| CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DEL DIQUE | |
|------------------------------------|----------------------------|
| F soportar | 5858,244 KN |
| σ_{\max} aplast | 6,88 KN/cm ² |
| Área necesaria | 852,108218 cm ² |
| Área x apoyo | 65,546786 cm ² |

| | |
|----------|---------------------|
| Radio | 6 cm |
| Espesor | 5 cm |
| Longitud | 10 cm |
| Área | 200 cm ² |

Uno de los aspectos importantes que se han tenido en cuenta a la hora del diseño de este elemento es que como debe soportar una gran carga vertical, los elementos podría verse sometidos a un efecto de pandeo, por ello se ha situado en la parte que está en contacto con la zona del dique un refuerzo transversal el cual reforzará el conjunto de la pieza.

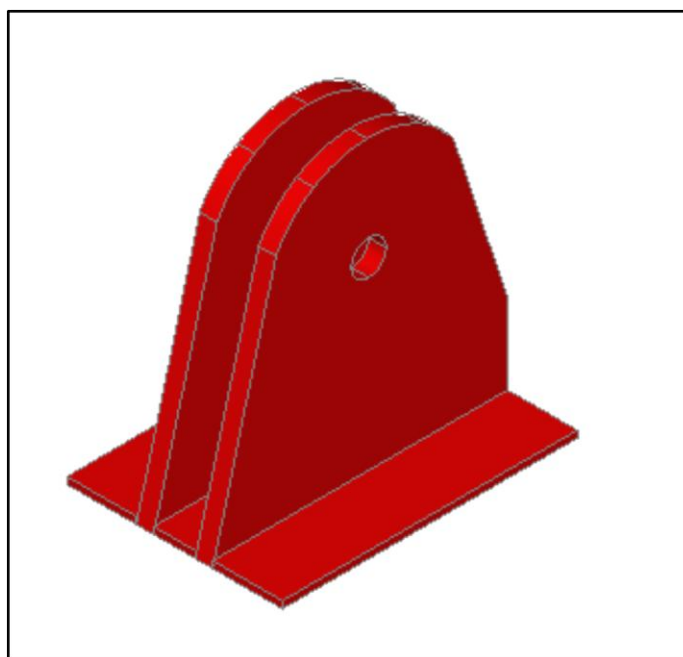


Imagen CAD elemento apoyo dique bisagra

2. Apoyo de la compuerta

Al igual que en el caso anterior este elemento está compuesto por una lamina horizontal, pero lo que difiere con el caso anterior es que en vez de tener dos elementos verticales solo tiene un elemento el cual se posicionará entre los otros dos elementos del apoyo del dique. Los cálculos de las dimensiones y esfuerzos de este elemento se describen en la siguiente tabla:

| CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DE LA COMPUERTA | |
|--|----------------------------|
| F soportar | 5858,244 KN |
| $\sigma_{\text{max aplast}}$ | 6,88 KN/cm ² |
| Área necesaria | 852,108218 cm ² |
| Área x apoyo | 65,546786 cm ² |

| | |
|----------|---------------------|
| Radio | 6 cm |
| Espesor | 10 cm |
| Longitud | 10 cm |
| Área | 200 cm ² |

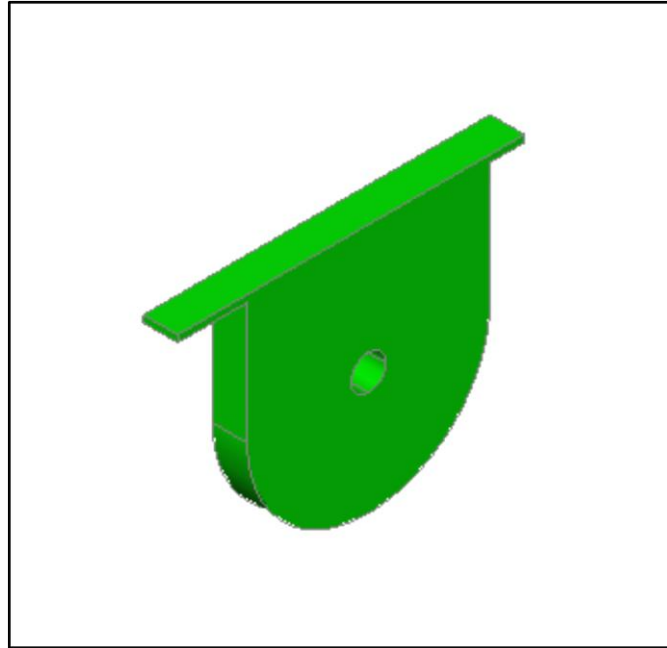


Imagen CAD elemento apoyo compuerta bisagra

3. Pasador y cojinete

Son los elementos que transmiten las tensiones desde la compuerta hasta el dique; se ha de tener en cuenta que cuando la compuerta se desplace provocará unas ciertas tensiones las cuales deberán ser soportadas por dichos elementos. Los cálculos de ambos elementos aparecen descritos en las siguientes tablas:

| CÁLCULO DE LOS COJINETES | |
|---------------------------------|----------------------------|
| F soportar | 5858,244 KN |
| σ_{max} admisible | 6,89 KN/cm ² |
| Área necesaria | 849,785294 cm ² |
| Área x apoyo | 65,3680995 cm ² |

| | |
|-----------------------|---------------|
| Radio | 4 cm |
| Longitud | 4,08550622 cm |
| Radio interior | 4 cm |
| Radio exterior | 6 cm |
| Longitud | 5 cm |

| CÁLCULO DEL PASADOR | |
|--------------------------------|----------------------------|
| CÁLCULO CORTANTE | |
| F soportar | 5858,244 KN |
| $\sigma_{\text{max cortante}}$ | 4,58 KN/cm ² |
| Area necesaria | 1278,16233 cm ² |
| Area x apoyo | 98,320179 cm ² |
| Radio | 3,95577498 cm |
| CÁLCULO APLASTAMIENTO | |
| F soportar | 5858,244 KN |
| $\sigma_{\text{max cortante}}$ | 6,88 KN/cm ² |
| Area necesaria | 852,108218 cm ² |
| Area x apoyo | 65,546786 cm ² |
| Longitud x apoyo | 4,14247438 cm |
| Longitud | 5 cm |
| Radio | 4 cm |

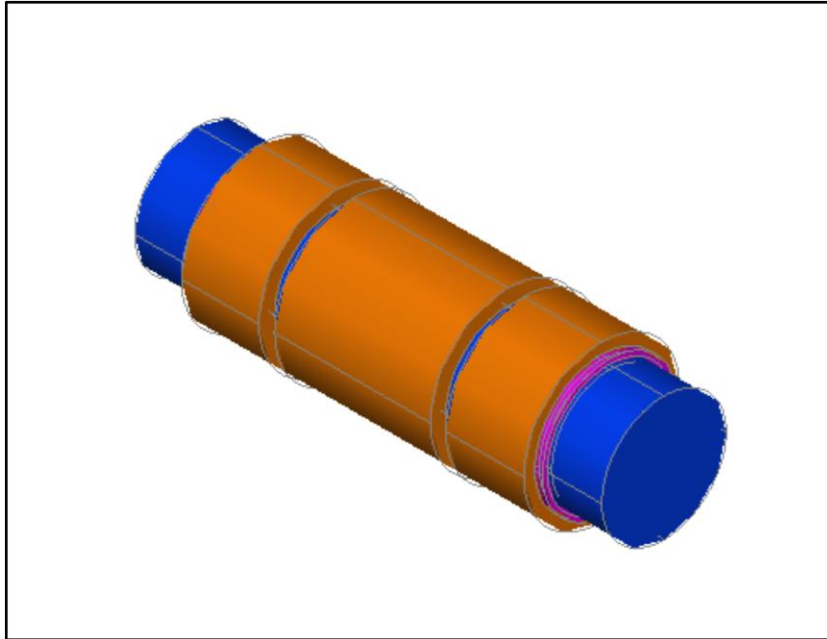


Imagen CAD pasador, cojinetes y aros de la bisagra

MEDIOS DE ELEVACIÓN

La compuerta como ya se ha explicado se abre por gravedad y por diferencia de pesos entre la compuerta y el volumen de agua desplazado, pero a la hora del cierre de la misma es necesario un sistema mecánico que eleve la misma desde el fondo hasta su posición vertical. En el mercado existen distintos métodos de elevación los más habituales son los siguientes:

- **Diferencia de densidades:** Al contrario de la construcción realizada en esta compuerta en la cual se ha impuesto que el peso de la compuerta sea superior a la densidad del agua salada para que se sumerja por completo; en otras construcciones la compuerta tiene en su estado natural un peso total que es inferior a la cantidad de agua que desplaza. Su funcionamiento se basa en que se puede lastrar y deslastrar el interior de la compuerta, de dicha forma se varía la relación de densidades entre la compuerta y el agua salada.

La variación de las densidades hace variar la ecuación hidrostática del conjunto y esto permite la correcta actuación de la misma. A la hora de lastrar la compuerta se abren unas válvulas automáticas situadas en la parte inferior de la compuerta que permiten que el agua vaya entrando progresivamente. Para deslastrar la misma, lo que se utiliza es la inyección de aire a presión el aire se va acumulando en la parte superior de la compuerta y el agua va saliendo por las válvulas situadas en la parte inferior.

La mayor problemática de dicho sistema es que la estructura debe de aguantar tanto cargas externas debidas a la presión del agua, como las cargas internas debidas a la presión generada por el aire. Éstas presiones no son excesivas pero al aplicarse en superficies tan extensas pueden provocar problemas de flexiones excesivas, haciendo más compleja la estructura interna de la misma.

- **Pistones hidráulicos:** Este sistema es uno de los más utilizados cuando las compuertas son de bisagra lateral o cuando sus dimensiones no son excesivamente grandes. El sistema es bastante simple, los pistones se sitúan en los laterales internos del dique y se acoplan a la parte interna de la compuerta mediante sus respectivas sujeciones. Se dispone de una planta hidráulica que envía la potencia necesaria para el hundimiento y elevación de la misma.

El principal problema de dicho sistema es que para compuertas muy grandes se necesitan pistones con carreras muy elevadas ya que si se colocan las sujeciones por la zona central de la compuerta se producen fenómenos de flexiones excesivos debido a sus dimensiones. Otro problema es que los pistones trabajan durante un cierto tiempo totalmente sumergidos en agua salada, es por ello que se deben tener en cuenta los materiales de construcción y un mantenimiento adecuado de toda la instalación.

- **Elevación mediante cables o cadenas:** Dicho sistema se basa en que la compuerta tiene una densidad total superior al volumen del agua que desplaza, por lo tanto se sumergirá por su propio peso. A la hora de realizar la elevación de la misma para el cierre del dique se utilizan cables o cadenas las cuales están sujetas a la compuerta mediante unos acoplamientos adecuados.

El otro extremo del cable o cadena, se encuentra el equipo elevador, normalmente se tratará de un motor eléctrico el cual lleva acoplado una reductora la cual hará girar una serie de poleas a una velocidad lenta que haga elevarse la compuerta. Es de vital importancia, tanto en este sistema como en los anteriormente mencionados, que la velocidad de la compuerta tanto a la hora de elevarse como de hundirse sea lenta. Ya que si se realiza esta maniobra de forma rápida se deberían tener en cuenta las acciones dinámicas de la interacción entre la compuerta y el agua, lo que dificultaría en exceso la construcción de la misma.

Dicho sistema es el más empleado a la hora de elevar grandes compuertas ya que permite una versatilidad bastante amplia y su instalación y mantenimiento son bastante sencillos.

- **Sistemas mixtos:** Como es habitual en la ingeniería no hay una opción perfecta que sea "la panacea" de todo es por ello que surgen métodos que juntan las mejores características de los sistemas ya mencionados y las intentan unir para una mayor eficiencia y versatilidad.

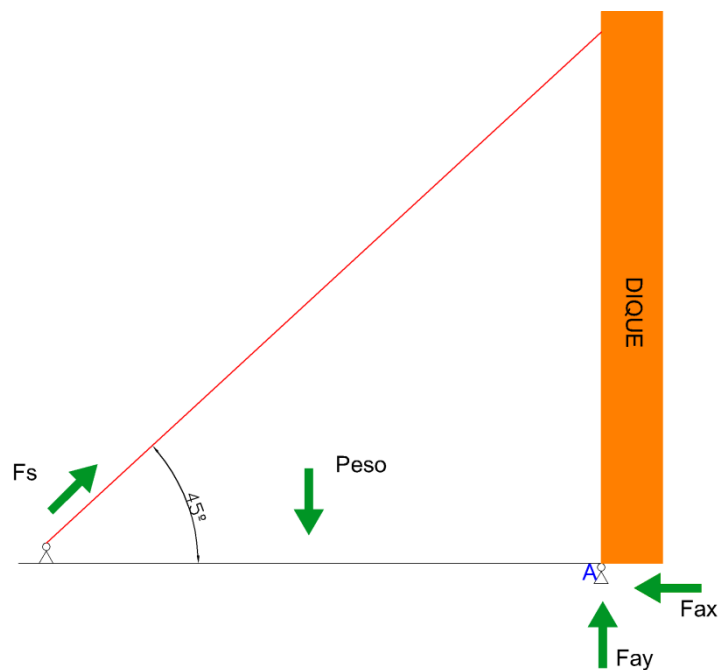
En dicho dique se ha optado por la elección del sistema de cables para la elevación de la compuerta, los motivos de dicha elección son los siguientes:

- Dique con relación de peso superior a 1, la densidad total de nuestra compuerta es superior al volumen de agua desplazada por lo tanto este método funcionaría de forma adecuada al propósito del sistema.

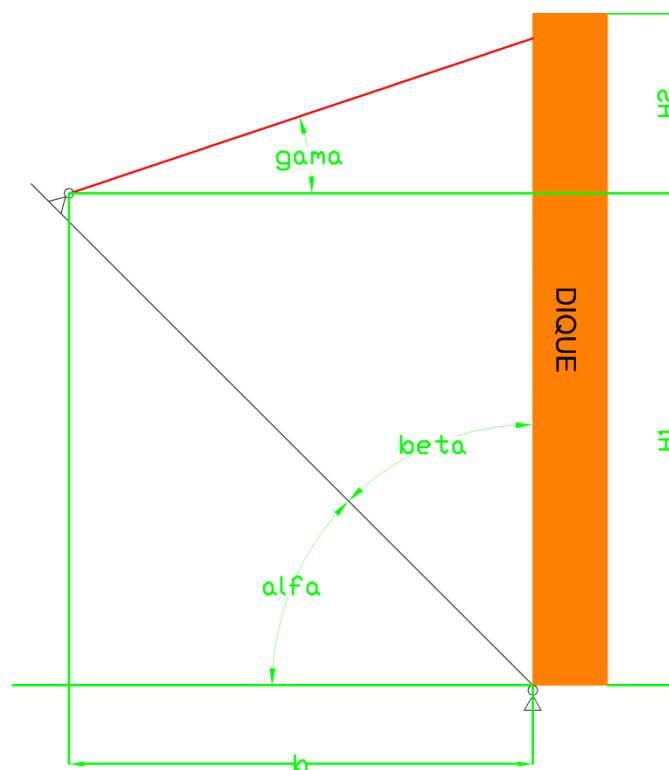
- Simplicidad, el sistema en su conjunto es muy sencillo y no tiene una gran cantidad de elementos móviles que al fin y al cabo son los que suelen provocar una cantidad superior de fallos en las instalaciones.
- Adaptabilidad, debido a la sencillez de sus elementos, motor eléctrico, caja reductora, poleas y cables; se puede adaptar perfectamente a dicha compuerta, en el caso de utilizar pistones, deberíamos variar nuestro diseño para el rango de pistones existentes en el mercado o pedir que se fabricasen según nuestras especificaciones.
- Coste, gracias a las dos razones mencionadas anteriormente (simplicidad y adaptabilidad) el valor total de la instalación será bastante reducido, hay que tener en cuenta que la mayoría de los elementos pueden conseguirse a nivel industrial de una forma bastante sencilla.
- Mantenibilidad, el mantenimiento será casi inapreciable únicamente se deberá tener una cierta vigilancia de los elementos móviles y de que los cables no sufran una degradación excesiva, para ello se comentarán varias actuaciones posibles.

A continuación se expondrá de forma detallada la metodología y los cálculos empleados a la hora de la elección de los cables y de sus dimensiones.

Primeramente se debe tener en cuenta cual es la carga máxima que deberán soportar dichos cables, ya que debido a que la compuerta se mueve los ángulos de actuación variaran y por lo tanto la carga fluctuará de la misma forma.



Esquema fuerzas levantamiento compuerta



Esquema dimensiones levantamiento compuerta

Como se puede ver en los esquemas la carga principal que deberá soportar el cable es el peso propio de la compuerta, pero debemos tener en cuenta que al estar sumergida en el agua a dicho peso le deberemos restar el equivalente al volumen de agua desplazado por la misma. Por lo tanto tenemos:

| | |
|----------------------|--------------|
| Peso agua desplazada | 4881870,00 N |
| Peso compuerta | 5858244,00 N |
| Peso a levantar | 976374,00 N |

Una vez tenemos el peso debemos conocer las formulas que rigen dicho sistema, tendremos los sumatorios de fuerzas y momentos, y dentro de estas las funciones trigonométricas que vendrán dadas en función de la variación del ángulo alfa.

$$\sum F_y = 0; F_{Cy} - \text{Peso propio} + F_{Ay} = 0$$

$$\sum F_x = 0; F_{Cx} - F_{Ax} = 0$$

$$\sum M_{xy} = 0; F_{Cy} * (13 + 0.75) - \text{Peso propio} * (((b * 0.75)/2) + 0.75) = 0$$

$$F_{Cx} = \sin(\alpha + \gamma) * F_C$$

$$F_{cy} = \cos(\alpha + \gamma) * F_c$$

$$h_1 = \sin \alpha * (0.75 + 13)$$

$$h_2 = (0.75 + 13) - \sin \alpha * (0.75 + 13)$$

$$b = \cos \alpha * (0.75 + 13)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{h_2}{b}\right)$$

Con dichas formulas se ha realizado una tabla,(tabla 1 y tabla 2 - anexos) en la cual se puede ver como varían todos los valores de las variables implicadas en el sistema. Con los datos obtenidos se ha buscado el valor más elevado de la carga que deberá soportar el cable, dichos valores son los siguientes:

| ACCIONES-REACCIONE-MOMENTOS | |
|-----------------------------|----------|
| ΣF_x | 0,00 N |
| ΣF_y | 0,00 N |
| ΣM_{xy} | 0,00 N*m |

| | |
|----------------|-------------|
| Peso compuerta | 976374,00 N |
| F sujeción | 728060,23 N |
| FA x | 541443,76 N |
| FA y | 434930,23 N |
| F sujeción x | 541443,76 N |
| F sujeción y | 541443,76 N |

| VARIACIÓN ANGULOS | |
|-------------------|---------|
| h1 | 0,00 m |
| h2 | 13,75 m |
| b | 13,75 m |
| h2/b | 1,00 |
| α | 0,00 ° |
| β | 90,00 ° |
| γ | 45,00 ° |

Como se puede comprobar el valor máximo de la carga se encuentra cuando la compuerta se encuentra totalmente extendida, esto es un dato totalmente razonable ya que cuando la compuerta se encuentre completamente levantada el peso se distribuirá hacia los elementos

de apoyo propios de la compuerta dejando al cable con la tensión mínima posible. Una vez se conoce la tracción a la que está sometida el cable se debe averiguar la sección necesaria para que soporte dicho esfuerzo.

| | |
|--|-------------------------|
| σ_{\max} acero | 27,5 KN/cm ² |
| factor de seguridad | 4 |
| Longitud máxima | 19,44 m |
| Área | 105,89 cm ² |
| Esta será el área mínima necesaria para poder soportar la carga de la compuerta al elevarse. Debemos dividirla en dos por los dos extremos de la compuerta | |
| Área x extremo | 55.68 cm ² |

Una vez que tenemos el área necesaria para poder soportar la carga debemos elegir cuantos cables vamos a situar para poder levantar la puerta. La elección de la cantidad de cables es un dato muy importante a nivel de operación de la compuerta, ya que es mucho más sencillo encontrar elementos y sistemas para cables pequeños que no para cables de diámetros elevados. Es por ello que en dicha compuerta vamos a optar por la opción de elevar la compuerta con múltiples cables que converjan en un mismo apoyo en las esquinas superiores de la compuerta.

| NÚMERO DE CABLES PARA ELEVAR LA COMPUERTA | | | |
|---|------------------------------------|----------|-----------------|
| Área necesaria | | 55.69 | cm ² |
| Numero de cables | | 5,00 | |
| Área x cable | | 11.14 | cm ² |
| Cable seleccionado | radio(mm) | 20,00 | |
| | sección(mm ²) | 1256,64 | |
| | sección(cm ²) | 12,57 | |
| | Fuerza(KN) | 765.72 | |
| | Modulo Young (KN/cm ²) | 21000,00 | |
| | Alargamiento (cm) | 0,06 | |

Se ha escogido un cable con un sección ligeramente mayor para asegurarnos de que aunque exista un cierto deterioro el sistema tendrá la suficiente seguridad para funcionar de forma normal. Una vez tenemos los valores técnicos de cómo debe ser el cable debemos ir a catálogos de fabricantes a buscar cual de los existentes en el mercado es el más adecuado a nuestra aplicación. En nuestro caso hemos ido a buscarlo a la casa BRIDON, que se dedica

entre otras cosas a la fabricación de cables para cargas elevadas, tanto a nivel terrestre como marítimo.

Se ha optado por la selección del modelo Endurance DYFORM 34LR & 34LPI, dicho cable está formado por un conjunto de alambres enrollados en grupos de 6, los cuales tienen un alma metálica. Tanto los alambres como las almas no tienen sección circular si no que tienen una sección la cual permite aprovechar de una forma más adecuada todo el área. Hay distintos tipos de cordones en función de la posición en la que se encuentre el mismo, los de la zona exterior e interior son de área superior a los de la zona media del mismo; esto se realiza para generar una mayor flexibilidad al cable sin perder resistencia mecánica.

Se ha escogido dicho cable ya que según el fabricante es adecuado para medios marinos y por lo tanto soporta adecuadamente el contacto con el agua salada y los elementos que pueda haber en esta, además según su ficha técnica es capaz de soportar los cambios de temperatura de una forma correcta.

Una vez que se han seleccionado los cables que se van a utilizar, se deberá realizar el cálculo del motor necesario para la elevación de la compuerta, para ello se utilizará la fuerza necesaria para elevar la compuerta y las dimensiones de la polea que recogerá el cable al elevarse la compuerta.

| CÁLCULO DEL LA POTENCIA DEL MOTOR | |
|-----------------------------------|------------------|
| Potencia | 49,632 KW |
| Momento | 382.856 KN*m |
| Fuerza | 765.717 KN |
| Distancia | 0,5 m |
| Longitud | 19,445 m |
| Tiempo | 300 s |
| Velocidad | 0,06481812 m/s |
| Velocidad angular | 0,12963624 rad/s |

Dicha potencia sería la potencia total necesaria para elevar la compuerta utilizando una polea de 1 metro de diámetro en un tiempo de 300 segundos. Como se puede observar la velocidad necesaria es muy lenta, es por ello que lo más correcto sería utilizar un motor eléctrico que alcanzase la potencia necesaria y acoplar una reductora que nos permita reducir la velocidad hasta la adecuada.

En los datos del cálculo sale la potencia total necesaria para elevar la compuerta dicho valor se deberá dividir por dos para situarlos uno a cada banda del dique seco, además se deberán tener en cuenta las pérdidas mecánicas y debidas a la propia fricción con el agua al elevar la compuerta. Es por ello que situando dos motores de unos 35 kw cada uno, a cada banda del dique se tendrá la potencia necesaria para poder elevar la compuerta en su totalidad.

Diseño de la junta de estanqueidad

Se denomina junta de estanqueidad a unos componentes de material adaptable que sirve para sellar de forma adecuada la unión de dos superficies que se encuentran en contacto. Éstas rellenan todas las posibles ranuras existentes en el material evitando que haya una fuga del fluido a estanqueizar. Las juntas reducen considerablemente los costes de mecanización y preparación de las superficies que se encuentran en contacto. En nuestro caso las juntas de esta estructura evitaban que el agua salada existente en el exterior del dique seco, pueda penetrar por las imperfecciones de las superficies de contacto. En nuestro caso estas superficies son de materiales completamente distintos, por un lado tendremos hormigón armado y por el otro acero estructural.

La necesidad de instalar una junta viene dada por el hecho de que se precisa que el dique sea completamente estanco, ya que si continuamente está entrando agua por pequeña que sea esta cantidad, se deberán de ir encendiendo las bombas de drenaje continuamente para que la actividad en el dique no se vea alterada. El hecho de encender y apagar las bombas de forma bastante continuada puede ser de un elevado coste de operación, por ello se buscan dichos sistemas para evitar las fugas hacia el interior.

En el mercado industrial actual existe una gran variedad de juntas, cada una de ellas diseñadas específicamente para una aplicación en concreto, el problema es que debido a las dimensiones con las que estamos trabajando hay pocas empresas que tengan juntas que puedan funcionar correctamente a las necesidades que se requieren. Es por ello que se ha optado por el diseño de una junta específica para el dique, que se adapte por completo a la geometría y necesidades del mismo.

Para el diseño de la junta se van a seguir 4 puntos:

- Tipología de junta
- Geometría de la junta
- Materiales de la junta
- Anclaje de la junta

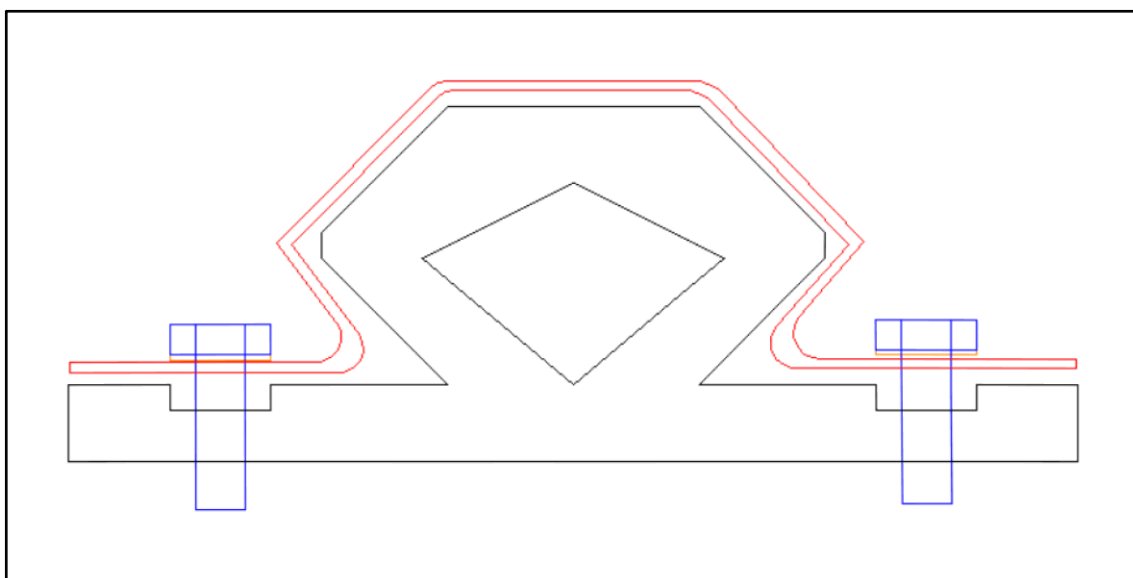
Tipología de junta:

La junta va constar de dos capas de material independientes, en la parte interna tendremos un conjunto que dará forma a la junta y tendrá la suficiente resistencia mecánica como para soportar el esfuerzo que deba soportar debido al aplastamiento de la misma; por el contrario la capa exterior será más elástica y tendrá una buena resistencia al desgaste por fricción. La elección de este tipo de junta ha sido una decisión tomada a partir del análisis de distintos tipos de juntas que existen en el mercado y escogiendo de cada una de ellas aquellas características que mejor se adaptaban a nuestras necesidades.

Las juntas internas estarán formadas por secciones de 1m de largo cada una, de esta forma el mantenimiento será más sencillo y en caso de que se degrade algún tramo en concreto su

recambio no será excesivamente caro. El interior de la junta interna estará completamente hueca, de esta forma se podrá deformar con una mayor facilidad y adaptarse mejor a el efecto de aplastamiento sufrido por la compuerta.

La junta exterior por el contrario será una lámina fina de material de entre 2 y 5 mm que recubrirá por completo la junta interior y su dimensión longitudinal será de más de 3m de largo. Esto permitirá que una lámina de junta exterior abarque varios tramos de junta interior proporcionando una mayor estanqueidad del conjunto; para evitar las posibles fugas entre los materiales se situará un tramo de junta por encima de la junta anterior, de tal forma que al posicionarse la compuerta la presión que ejerza selle por completo los espacios entre ambos elementos.



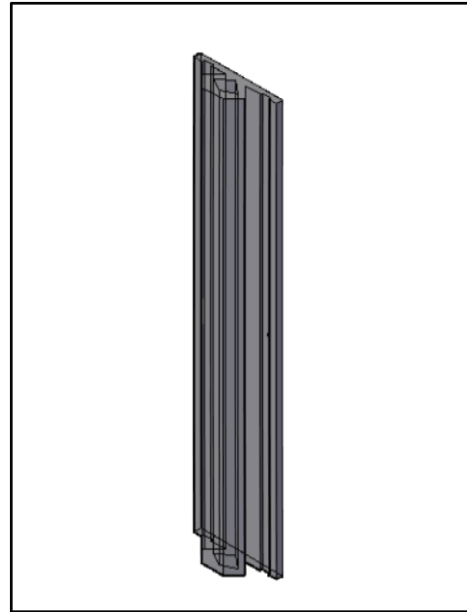
Detalle junta estanqueidad

Geometría de la junta:

La junta como ya se ha comentado está compuesta de dos partes, la parte externa serán unas laminas de material de forma rectangular que se adaptarán a la geometría de la junta interna, debido a su simplicidad no se hará un estudio más profundo de la misma. Por el contrario, la junta interior, si que tiene un estudio del diseño de su forma, ya que debido a que tiene que soportar el esfuerzo mecánico de la compuerta además de ser suficientemente deformable.

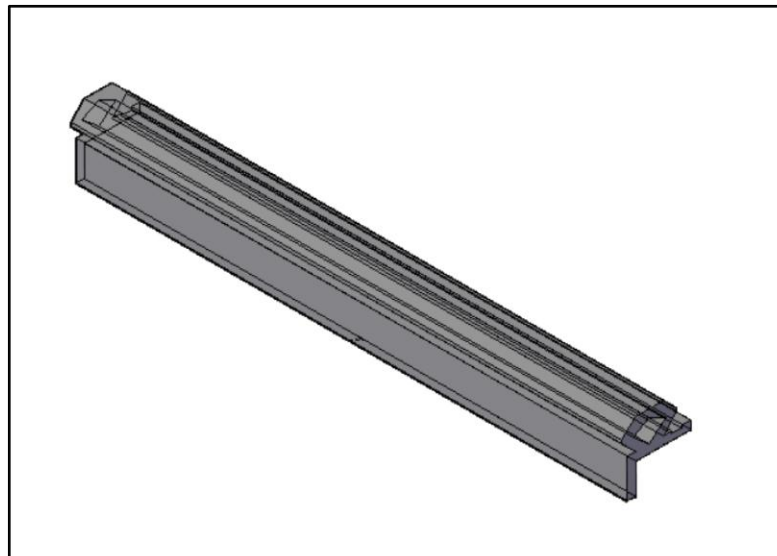
La junta interior está formada en su parte principal, por un prisma hexagonal del cual se ha extraído de su parte interna un prisma en forma de trapecio. La elección de esta forma se ha debido al hecho de que cuando la junta esté sometida a presión, el espacio interno permitirá una mayor deformidad de la misma a fin de adaptarse a los requisitos de su posición. Así mismo su forma exterior permite un correcto asiento tanto en la compuerta como en la zona del dique donde este situada. Según la posición a la que corresponda la junta existen 3 tipos de geometrías distintas:

- Posición vertical: Son las situadas en los extremos de la compuerta, dichas juntas deberán de ser soportadas mediante unos pernos anclados a la estructura del propio dique. Para ello dicha junta tiene a los laterales de la misma un borde labrado con un canal el cual permitirá situar un lámina metálica la cual generará una presión entre la junta interna y externa que mejorará el sellado general.



Detalle CAD junta estanqueidad vertical

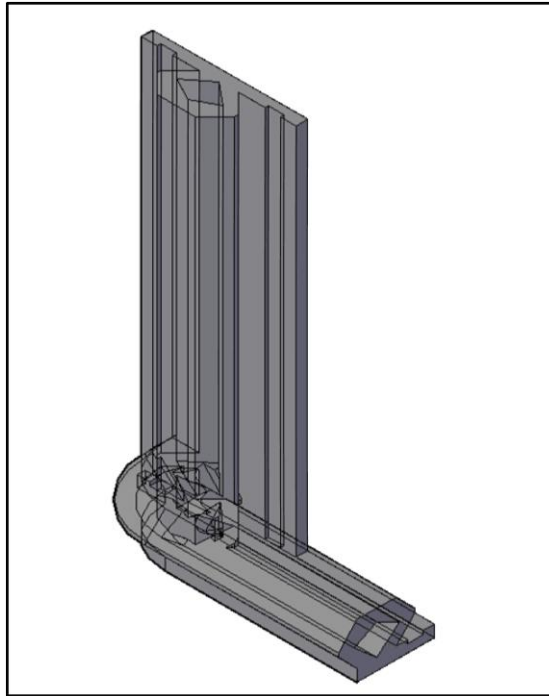
- Posición horizontal: Son las situadas en la parte inferior de la compuerta, dichas juntas sellarán en dique en la zona donde existe una mayor presión hidrostática. El problema principal de dicho elemento es que al encontrarse situado justo sobre el borde final de la cama del dique, este hecho hace que la junta se deba anclar en dos planos distintos uno horizontal en la propia cama y otro vertical.



Detalle CAD junta estanqueidad horizontal

- Esquinas inferiores: Son los dos tramos de juntas situados en las esquinas inferiores internas de la compuerta, posiblemente es en la zona donde pueda existir una pequeña fuga si no se hace un correcto mantenimiento de las juntas. Este elemento hace un cambio triple de dirección pasando por los 3 ejes de coordenadas, es por ello que su diseño ha sido bastante complejo. Se ha optado por este diseño porque es el único que nos aseguraba que cuando la compuerta estuviera completamente cerrada no existieran algunas pequeñas holguras por las cuales el agua de mar se filtrase hacia el interior. Los anclajes con el dique son bastante complejos y se basan en una mezcla

de los dos sistemas utilizados en los casos anteriores, hay uniones tanto en el plano horizontal como en el vertical.



Detalle CAD junta estanqueidad esquina inferior

Material de la junta:

Después de realizar distintas consultas a fabricantes de juntas industriales, el material seleccionado para el diseño de la junta de estanqueidad ha sido el caucho EMPD (etileno propileno dieno tipo M). Este material es un termopolímero elastómero que tiene muy buena resistencia a la abrasión y al desgaste mecánico; además tiene unas muy buenas cualidades en ambientes salinos. Algunas de las características más importantes son:

- La característica más apreciada en la industria es su resistencia a la oxidación. El dieno que se incorpora en la fase final de la polimerización, lo hace un elastómero difícilmente oxidable y le confiere una estructura micro-cristalina que no se destruye en ninguna de las operaciones de procesado (no necesita ceras, ni antioxidantes).
- Es destacable su resistencia a la intemperie y a los 2 / 4 agentes atmosféricos.
- Es muy resistente al calor, oscilando su campo de temperaturas entre los -15°C y los $+130^{\circ}\text{C}$. (en punta puede llegar a 140°C).
- Resistencia muy notable al agua en general, y sobre todo a las cloacales y residuales.
- Se han constatado en multitud de aplicaciones sus buenas propiedades de resistencia eléctrica.
- Su comportamiento en tuberías y manguitos de vapor es aceptable (no se degrada ni envejece con facilidad).
- Está dotado de un conjunto de propiedades mecánicas que, aunque no llegan a las obtenidas con caucho policloropreno-neopreno, son bastante aproximadas.

- Es muy fácil de procesar, fabricándose con suma agilidad piezas por extrusión, moldeo, transferencia y confección.
- La adherencia al metal es idónea, sobre todo cuando se efectúa por reticulación con calor, es decir, mediante autoclave.
- Aventaja a todos los demás elastómeros en la resistencia al ozono (O₃), y en general es buen agente antiácido.
- Finalmente, aunque en los últimos años se ha mejorado ostensiblemente con la vulcanización peroxídica, este caucho tiene su gran problema en la compresión set. Ello quiere decir que la recuperación tras una deformación no es tan rápida como podría ser en el neopreno o en el SBR.

Anclaje de la junta:

Como ya se ha comentado anteriormente el anclaje de la junta a la compuerta se hará por medio de pasadores situados en la propia estructura del dique. Cuando se realice la construcción del dique se realizarán unos orificios donde posteriormente se anclarán unas varillas roscadas las cuales permitirán sujetar las juntas. Para anclar las juntas, se situarán unas laminas metálicas de acero inoxidable, en el canal labrado de la propia junta, y se sujetarán con roscas de diámetro adecuado del mismo material de la lámina de acero.

Cuando se realice el montaje de las juntas se deberán recubrir estas tuercas con unas fundas de goma para protegerlo de incrustaciones, a su vez se situarán algunos ánodos de sacrificio para evitar la corrosión de los materiales.

Estudio constructivo de la compuerta

Cuando se realiza cualquier tipo de proyecto no solo se ha de determinar las características propias del sistema y su funcionalidad, si no que se ha de realizar un estudio de si es posible construirlo físicamente con un coste aceptable. En dicho apartado se realizará un posible plan de construcción de los elementos principales de dicho sistema y su ensamblaje final en el propio dique.

Compuerta

La construcción de la compuerta es la parte más complicada de todo el proyecto ya que debido a su entramado de refuerzos interiores hace complicado realizar las soldaduras entre los elementos, por ello nos centraremos en el proceso que se debe seguir para realizar el ensamblaje de la misma. Primero deberemos conocer qué cantidad de materiales serán necesarios:

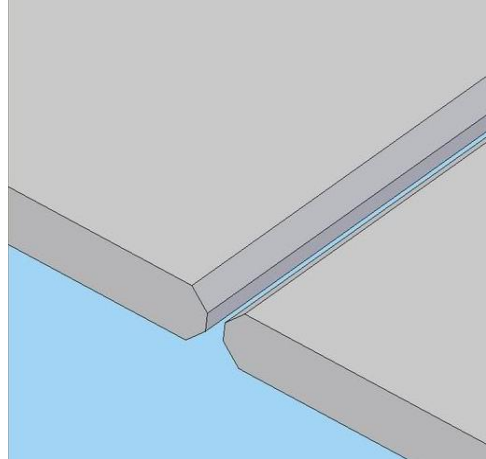
- Planchas exteriores:
 - 18 unidades de 2m x 6,5m.
 - 18 unidades de 2m x 7m.
- Planchas interiores:
 - 72 unidades de 1m x 6m.
 - 12 unidades de 1m x 3m.
 - 5 unidades de 0,5m x 6m.
 - 2 unidades de 0,5m x 3m.
- Planchas laterales:
 - 2 unidades de 1m x 6,5m.
 - 2 unidades de 1m x 7m.
- Planchas superiores e inferiores:
 - 12 planchas de 1m x 6m.
- Refuerzos verticales :
 - 144 perfiles HEB 300 de 13,5m
- Refuerzos horizontales:
 - 30 perfiles HEB 340 de 12m.

Se debe tener en cuenta que las planchas de los forros serán de 30 mm de espesor, y que además se deberán incluir en el material escuadras de acero que se utilizarán para reforzar los laterales de la compuerta ya que aunque no deben soportar esfuerzo es recomendable que tengan una superficie de apoyo superior. Como material suplementario también se debe tener en cuenta todo lo necesario para soldar, bobinas de material, bombonas de gas, electrodos, etc.

Una vez se conocen los materiales necesarios para la construcción de dicho elemento se debe conocer el proceso de montaje de la misma, en este caso el proceso propuesto es el siguiente:

- 1- Soldadura planchas exteriores: Se soldarán las planchas exteriores situadas verticalmente, es decir una plancha de 6,5m con una de 7m. Para ello se utilizarán maquinas automáticas de soldadura continua las cuales nos permiten una soldadura más precisa que con métodos manuales.

Los cantos de dichas planchas deberán ser biselados para que la soldadura se realice de una forma más correcta, ya que debido a su espesor aunque sería posible realizarla desde una sola cara, es un sistema costoso porque se pierde tiempo dejando que el material se atempere para no provocarle esfuerzos térmicos.



Representación biselado planchas

Una vez que las planchas forman secciones de 13,5 m de largo por 2m de ancho se

deberán unir para formar todo el conjunto de planchas exteriores, para ellos se empleará el mismo metodo anterior pero situando las planchas en sentido contrario. Como el conjunto total debe medir 36m de largo, es complicado encontrár máquinas que puedan realizar dicha tarea si no es en astilleros navales de construcción o en industrias pesadas del acero, por ello se realizará en 3 secciones de 13,5m de alto y 12m de ancho las cuales deberán de ser unidad mediante soldadura manual.

- 2- Unión de las planchas exteriores con los refuerzos verticales externos: Para unir los refuerzos externos con las planchas se utilizará una máquina portátil de soldadura continua automatizada.

Dichos elementos se sitúan en los refuerzos acoplados con una serie de ruedas las cuales dotan a la máquina de un movimiento continuo y uniforme. A la maquina se le acoplan los distintos elementos necesarios para soldar, como puede ser la conexión con gas inerte y el royo de material de soldadura. Dicho sistema nos permitirá realizar una cantidad de soldadura muy elevada en un periodo de tiempo corto, esto nos reportará un beneficio económico importante.



Máquina de soldadura continua

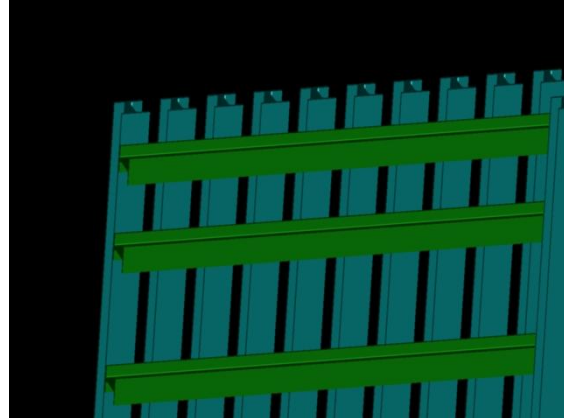
Además nos permite realizar la soldadura

en el espacio tan estrecho de que disponemos, ya que entre las alas de refuerzos continuos solo hay una distancia de 200mm.

- 3- Unión del conjunto con los refuerzos horizontales centrales: Los refuerzos verticales y horizontales deben estar unidos entre sí mediante una soldadura en los laterales de unión de los mismos. Esta soldadura se deberá de hacer manualmente, ya que hay cierta parte de la misma que una máquina no podría realizarlo debido a su complejidad.

Además de la soldadura con los perfiles transversales, los perfiles horizontales deberán ser soldados, ya que su dimensión es de 12m y la longitud total de la compuerta 36m.

Se comenzará la soldadura desde uno de los laterales superior, se realizarán todas las soldaduras con los perfiles transversales y después se unirá con el siguiente tramo del perfil horizontal. Una vez esta unión esté realizada se continuará con la soldadura con los perfiles transversales, y así sucesivamente con todos los perfiles horizontales de la compuerta.



Representación situación perfiles

- 4- Unión del conjunto con las planchas laterales y el fondo: Las planchas laterales de la compuerta irán soldadas tanto a las planchas internas y externas de la compuerta, como al fondo, a la parte superior y a los refuerzos horizontales de la misma.

Primero se deberán soldar las planchas con el lateral exterior de la compuerta, una vez esta soldadura esté completada se proseguirá por soldar cada uno de los perfiles horizontales con los laterales.

Después se debe colocar el fondo de la compuerta, este elemento va unido mediante soldaduras a los laterales, las planchas internas y externas y los refuerzos verticales de la compuerta. Primero se realizarán las soldaduras con las planchas exteriores y laterales de la compuerta y por ultimo con los perfiles exteriores de la misma.

En dicho momento la compuerta se podría considerar una especie de cajón en el cual se han soldado una serie de perfiles de forma transversal entre sí.

- 5- Unión del conjunto con los refuerzos verticales internos: como sucedía en el caso anterior, se deben unir los refuerzos verticales internos con los horizontales, este proceso también deberá ser manual de forma que las 4 soldaduras de unión de cada uno de los refuerzos verticales con los horizontales se realizará en un tiempo considerable. Es por ello que en esta fase del proyecto la cantidad de soldadores asignados a esta tarea deberá de incrementarse para que el proceso no se alargue más de lo debido.

- 6- Unión planchas internas con el conjunto: Esta es la parte de la construcción de la compuerta que comporta una mayor complejidad y que se ha estudiado con gran

detenimiento para lograr realizar todas las soldaduras de la forma más correcta posible. Las planchas se deben unir entre sí de manera correcta para poder soportar los momentos flectores y mantener la estanqueidad del conjunto. Al contrario que sucedía con las planchas exteriores que estaban situadas verticalmente, en este caso situaremos las mismas horizontalmente en secciones de 1m, se realiza dicho cambio debido a que si se sitúan verticalmente se haría prácticamente imposible una soldadura correcta.

Se comenzará soldando los conjuntos de planchas de 1m entre sí formando planchas continuas de 36m de largo, dichas secciones serán transportadas de tal forma que no sufran deformaciones ni tensiones debido al movimiento. Una vez que se disponen de dichas secciones, se comenzará el proceso de soldadura. Se comenzará desde la parte inferior de la compuerta, se situará la sección inferior y se realizarán las soldaduras con el fondo de la compuerta y los laterales de la misma.

Una vez la sección esté unida al resto de planchas se comenzarán a soldar con cada uno de los perfiles de refuerzos verticales internos. El principal problema de esta operación es que nos encontraremos los refuerzos horizontales que reducirán el espacio de trabajo ya de por sí bastante pequeño. Se ha calculado y aproximadamente entre los espacios de dos refuerzos verticales habrá un hueco de 28 cm de ancho por unos 45 de largo, es un espacio suficiente para que una persona de complexión delgada pueda entrar al interior de la compuerta.

La idea es que a medida que se van colocando las planchas de refuerzo internas, los operarios puedan hacer las soldaduras desde el interior de la compuerta, para ello se deberá de situar un sistema de regeneración de aire para evitar problemas de asfixia o desmallo por la falta de oxígeno y aumento de la temperatura.

- 7- Unión del conjunto con la plancha superior: La plancha superior es solo un elemento de estanqueidad como una tapadera la cual no tendrá ningún tipo de carga de la estructura. Como la compuerta en su conjunto estará completamente soldada, se hace imposible el realizar las soldaduras de este elemento desde la parte interior, es por ello que se realizaran las soldaduras exteriormente en los cantos de soporte de las planchas exteriores.

Esta sería la secuencia general para la construcción de la compuerta, algunos aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de realizar dicho trabajo serán los siguientes:

- Periodo de construcción: Durante las distintas soldaduras puede aumentar mucho la temperatura general de la estructura, es por ello que se recomendará que la consecución de dicho elemento se realice durante las estaciones más frías del año intentado que las soldaduras de las planchas externas coincidan con los meses de Abril y Mayo.
- Cuando se realicen soldaduras en el interior de la compuerta se deben disponer sistemas de extracción locales de aire que eviten una acumulación de aire con bajo contenido en oxígeno.

- Siempre que se pueda se utilizará el método de soldadura continua MIG/MAG, en el caso que no sea posible se deberán utilizar electrodos que generen una soldadura lo más similar a la generada por el sistema anterior.
- Un problema que se deberá tener en cuenta en la construcción de la misma será el aprovisionamiento de los materiales necesarios para la construcción de la misma. La mayoría de los elementos que van a ser necesarios se podrán transportar con camiones normales. Pero todos los refuerzos verticales HEB 300 que miden 13,5 m de longitud deberán ser transportados mediante un convoy especial debido a que su longitud excede en 1,5m el límite máximo para ser transportado por camiones articulados.
Otro problema añadido además de la longitud será el peso máximo que pueden transportar dichos vehículos, se deberá realizar un plan de la ruta que deberán seguir teniendo en cuenta las posibles zonas conflictivas que se puedan encontrar en el trayecto.

Soportes:

Los soportes como ya se ha podido comprobar en el informe del diseño de los mismos son unos elementos que deben soportar una gran carga y debido a esto tienen unos espesores muy elevados. Estos espesores impiden la realización de dichos elementos mediante la soldadura de planchas de acero, ya que estas deberían de ser muy grandes y se producirían fenómenos de tensiones internas debidas a las propias soldaduras.

Debido a este hecho se ha optado por la fabricación de este tipo de piezas mediante fundición de acero. Dicho proceso se basa en el vertido de acero fundido en unos moldes prefabricados de arena, los cuales tienen la forma inversa a las piezas que nosotros deseamos realizar. La elección de dicho método entre otras razones se ha basado en la posibilidad de repetición de las piezas a partir de un patrón inicial, hay que tener en cuenta que los soportes existentes en la compuerta son los siguientes:

- 13 apoyos inferiores del dique.
- 13 apoyos inferiores de la compuerta.
- 12 conexiones de los apoyos internos.
- 6 apoyos internos del dique.
- 6 apoyos internos de la compuerta.

Como se puede observar la cantidad de elementos que se necesitarán es suficientemente elevado como para realizar la inversión de construcción de unos patrones y moldes para la fabricación de los mismos.

Se deberán construir 4 tipos de moldes distintos, ya que los apoyos internos del dique y de la compuerta han sido realizados con la misma geometría con la intención de reducir los costes de producción. La diferencia esencial entre unos y otros es que los destinados para el dique en su parte inferior se le realizarán unos anclajes mediante soldaduras que le permitirán sujetarse a los cimientos del dique, por el contrario los destinados a la compuerta como deberán poder

moverse se les realizará un acabado con un cierto pulimiento de la superficie para facilitar el movimiento del mismo.

El proceso de construcción de dichos elementos sigue el siguiente orden:

- 1- **Construcción del patrón:** Se debe construir una representación idéntica a la que se necesita en cada uno de los apoyos, para ello se pueden utilizar cualquier tipo de material, aunque es importante que mantenga su forma con el paso del tiempo, sea resistente y no le afecten en exceso los incrementos de temperatura. Normalmente en la industria metalúrgica se suelen utilizar moldes de metales más blandos como podría ser el aluminio. Para la realización de dichos patrones se utilizan, tornos, fresas y taladros guiados por métodos CNC, que aceleran de una forma espectacular el proceso de fabricación de dichos elementos.
- 2- **Realización de los moldes:** Se ha de realizar un molde para cada una de las piezas que se va a construir en nuestro caso tendremos un total de 50 moldes de las distintas piezas. Los moldes se realizan colocando la pieza en el interior de un cajón, después se va rellenando con una arena especial humedecida que aguanta las altas temperaturas sin sufrir deformaciones. La arena se debe ir compactando para que no queden espacios vacíos en la zona próxima del patrón, una vez se ha terminado de rellenar se retira el patrón y se deja secar la arena.
En algunas ocasiones cuando las piezas son muy complejas se pueden hacer los moldes en varias partes y después se hacen coincidir para formar una sola pieza. Cuando se realiza el molde se deben prever los orificios para el vertido de la colada hacia el interior del molde.
- 3- **Vertido de la colada:** El acero se debe calentar hasta una temperatura a la cual se fundido de forma continua. Una vez este tiene las características idóneas, se deposita en una cuba la cual se transporta hacia la zona donde están situados los moldes para realizar el vertido.
El acero se vierte dentro del molde mediante los agujeros que previamente se habían realizado, cuando el acero empieza a desbordarse de molde nos indica que el molde está completamente lleno y por lo tanto puede parar de verterse en ese molde y continuar con el siguiente.
- 4- **Retirada del molde:** una vez se ha vertido los moldes se dejan reposar durante un cierto periodo en el cual el acero pierde temperatura y se comienza a solidificar, este proceso puede durar entre 6 y 24 horas en función de distintos procesos que se sigan. Una vez transcurrido dicho periodo el molde puede ser quitado, para ello lo más usual es utilizar una maza que desquebrajará el molde de arena, para eliminar la parte de arena más próxima a la pieza puede utilizarse aire a presión o chorreado de la propia arena.
Todo este proceso se hace en unos emplazamientos especiales que permiten la recuperación de la arena para un uso posterior. Una vez la pieza está completamente limpia de arena, se debe dejar enfriar un cierto periodo de tiempo para que el material no sufra tensiones que afecten a su micro estructura interna.

- 5- **Mecanizado final:** Las piezas una vez se han enfriado se preparan para cada una de sus funciones y se realizan los mecanizados finales para su conexión con el resto de piezas del sistema como pueden ser los orificios de colocación de los cojinetes de material compuesto, pulido de superficies, etc.

Para realizar dichos elementos lo más razonable sería encargarlos a una acería ya que tienen los medios técnicos y conocimientos para realizar dicha actividad. En España existen un gran número de acerías tanto de nivel mundial como de producción pequeña situadas en su mayoría en la zona del norte. Es por ello que encontrar un proveedor de dichos elementos no debería suponer un gran problema y su transporte hasta la zona de construcción se podría realizar mediante transporte normal por carretera.

Pasadores:

Los pasadores como ya se comentó en el apartado de diseño estarán realizados por acero inoxidable, la resistencia mecánica de los mismos es un poco inferior al acero normal pero debido al ambiente salino en el que nos encontramos es la forma de asegurarnos que la corrosión no nos afecte al sistema. Para la realización de dichos elementos se utilizara un torno por control numérico el cual tiene una precisión extremadamente elevada.

Los aspectos relevantes a tener en cuenta a la hora de construir los pasadores es procurar que una vez realizados no sufran ningún daño superficial ya que esto podría afectar a su funcionamiento posterior e incluso iniciar problemas de grietas debido a las cargas tan elevadas que soportan.

Cojinetes:

Los cojinetes están formados por un material denominado MARITEX, el cual tiene unas propiedades físicas que le permiten hacer la función de los cojinetes sin necesidad de ser lubricados. Dichos elementos debido a su complejidad se pedirán directamente al fabricante a partir de los planos realizados de los mismos.

El resto de elementos de los que está compuesta la compuerta tales como cables, ánodos de sacrificio, junta de estanqueidad, etc. se han ido explicado a lo largo de este informe en mayor o menor medida en función de su complejidad.

Una vez se tienen definidos todos los elementos y sus características viene el proceso de ensamblaje del conjunto, esto es un proceso lento y que tiene una gran complejidad y que en los proyectos reales en los cuales se trabajan con grandes pesos, como es nuestro caso, tienen proyectos individuales para cada una de estas acciones.

Procedimiento de construcción

A continuación se realizará un breve esbozo de cuáles serían los pasos idóneos a seguir para el ensamblaje correcto de todos estos elementos. Cabe destacar que este proceso no es el único que se puede seguir para lograr el montaje completo de la instalación, pero es el que nos ha parecido más adecuado.

1. **Colocación apoyos dique:** el sistema de la compuerta tiene dos tipos de elementos que deben ser anclados al dique cuando este está siendo construido, dichos elementos son los apoyos tanto inferiores como los interiores. Cuando se realice el fraguado de la cama del dique se deben realizar los cimientos de los mismos para asegurar una correcta transmisión de las reacciones a la estructura general del dique.

Para ello lo más recomendable sería hacer un enrejado especial en la zona donde se sitúen los apoyos para dotarles de un mayor refuerzo que evite que estos puedan verse arrancados por las tensiones. Otra opción sería situar bajo cada apoyo una estructura metálica de gran dimensión unida solidariamente a los mismos y que cuando quedase cubierta por la capa de hormigón formase un bloque macizo de gran resistencia.

Se deben colocar los apoyos durante la construcción porque es la forma que tengan una mayor resistencia, además es necesario que pase un cierto período de tiempo entre que el hormigón es vertido y este alcanza su máxima resistencia, si se le aplican esfuerzos excesivos antes de que este llegue a su estado normal puede verse afectada su resistencia posterior.

2. **Ensamblaje de la compuerta:** Mientras el dique se ha ido construyendo la compuerta pueda haber ido ensamblándose siguiendo los pasos mencionados anteriormente. Es importante comprender que en los proyectos de gran envergadura muchas veces las tareas se verán solapadas unas con otras y es por ello que se deberá tener un calendario preciso de cuando se deben tener listo cada trabajo.

Para que el proyecto dure lo menos posible, la estructura de la compuerta debería estar lista aproximadamente en el mismo período en el que el dique haya finalizado su construcción.

3. **Apoyos inferiores de la compuerta:** La compuerta consta de 11 apoyos interiores situados a lo largo de la parte inferior de la misma, la instalación de los mismos se realizara a posteriori de la construcción de la estructura total de la compuerta. Cuando la compuerta este completamente finalizada y colocada horizontalmente, se instalaran estos apoyos mediante la soldadura de los mismos a la estructura de la compuerta.

Dichas soldaduras deberán ser realizadas con una alta precisión y sin que se produzcan errores que puedan debilitarla, hay que tener en cuenta que estas transmitirán una gran cantidad de carga y si no se realizan correctamente pueden verse comprometidas y sufrir agrietamientos, con el consecuente perjuicio mecánico que ello comportaría.

4. **Montaje de los apoyos internos de la compuerta:** Se deben de construir cada uno de los 6 apoyos internos que soportaran la presión hidrostática desde el interior del

dique. Para ello se partirán de los perfiles metálicos interiores HEB 450, a estos se les deberá soldar en sus extremos los apoyos de conexión con el dique y la compuerta.

Una vez que estos apoyos han sido soldados, se deben juntar la conexión superior del apoyo con el elemento de apoyo que irá en contacto con la compuerta. Para ello primero se deben instalar los cojinetes, para que los cojinetes no se muevan dentro del orificio lo que se realizará es una chaveta entre ambos elementos que asegurará el correcto fijado de ambos elementos.

Una vez ambos elementos tienen colocados los cojinetes se introducirá el pasador metálico con suavidad para no dañar el inicio del cojinete.

5. **Montaje de los cojinetes:** De la misma forma que se había realizado en el caso anterior, se deberán instalar todos los cojinetes de todos los elementos de la compuerta. Se debe ir con especial cuidado de no dañarlos, ya que si sufren algún desperfecto deberán de ser extraídos y rechazados para su instalación en la compuerta.

6. **Levantamiento de la compuerta:** El levantamiento de la compuerta es una de las tareas más peligrosas que se realizará a la hora de construir el dique. La compuerta en si misma pesa más de 500 ton y tiene una superficie lateral de unos 500m²; esto hace que su movimiento sea extremadamente complicado. Como ya se ha dicho anteriormente el estudio de cómo manejar un peso de dichas características en si mismo sería un proyecto en la vida real. En nuestro caso solo vamos a dar algunas referencias de cómo debería realizarse dicho proceso.

Por el peso que se debe levantar lo más aconsejable sería la utilización de dos grúas tipo oruga, las cuales pueden levantar grandes pesos y desplazarlos con facilidad. La compuerta debería construirse próxima a uno de los laterales del dique para facilitar su levantamiento, ya que si no es así se deberá desplazar hasta dicha posición para su elevación.

Se situarían cada una de las grúas en uno de los extremos del dique, la compuerta deberá haber sido provista de una serie de ganchos a lo largo sus lados principales donde se instalaran los cables de sujeción de la misma. Se realizará un levantamiento de toda la compuerta desde uno de los laterales y posteriormente se irá girando hasta pasar a un punto donde ambos lados de la compuerta tienen el mismo esfuerzo de carga.

Es evidente que este proceso no es trivial y que supone un gran número de cálculos para ver que la compuerta va a soportar dichos movimientos y en caso contrario buscar métodos alternativos de desplazamiento de la misma.

7. **Posicionamiento de la compuerta y anclaje de pasadores:** Una vez que la compuerta esta levantada se debe realizar en el menor tiempo posible el siguiente paso, que es el de anclar la compuerta al dique. Para ello se deberá situar en una posición completamente vertical y transversa al dique y descender lentamente.

Una vez se aproxime a su punto de contacto los operarios situados en la parte inferior deberán ajustar uno a uno los distintos anclajes para que pasen por las holguras que se han previsto. Cuando la compuerta empieza a bajar con facilidad se deberá ir

comprobando su situación hasta llegar a la posición en que los pasadores coinciden correctamente, este es el punto en el que se deberán introducir uno a uno los 11 pasadores inferiores, una vez estos estén colocados se instalarán los aros de retención. Posteriormente se dejará de ejercer tensión en las grúas suavemente para que la compuerta descanse todo su peso sobre los apoyos, si todo es correcto se podrán quitar los cables de sujeción de la parte exterior y la compuerta se dejará descender hasta posicionarla horizontalmente.

- 8. Colocación de los apoyos internos:** Una vez la puerta se encuentra en posición horizontal se deberán colocar los apoyos internos. Primero se introducirán en los rieles que la compuerta lleva provistos en su parte interior, una vez que estos estén en dicha posición se estirarán hacia el interior del dique hasta hacerlos coincidir con la posición de los anclajes situados en el interior del dique.
Posteriormente se deberán introducir los pasadores de dichos elementos y colocar los aros de seguridad que evitarán que los pasadores se desplacen axialmente.
- 9. Instalación de la junta de estanqueidad:** Para la instalación de la junta se realizarán una serie de orificios a lo largo de toda la superficie externa de la zona de asiento de la compuerta. Una vez realizados los orificios se introducirán unos pasadores de acero inoxidable los cuales estarán sujetos con una masilla epóxica de alto rendimiento.
Posteriormente se deberán ir colocando cada uno de los tramos de la junta teniendo en cuenta que está compuesta por dos partes y que se debe colocar una lámina metálica en cada uno de los extremos para generar una presión continua a lo largo de toda la junta. Posteriormente se colocarán las arandelas y tuercas de seguridad y se recubrirán con unas capuchas de plástico para prevenir de las incrustaciones.
- 10. Instalación de los elementos elevadores:** Cuando la estructura del sistema esté completada se deberá instalar todo el sistema de motores, poleas, reductoras, cables y elementos de control; necesarios para la elevación y apertura de la compuerta.
- 11. Instalación de los ánodos de sacrificio:** Se deberán instalar los ánodos de sacrificio en todas aquellas zonas indicadas en el proyecto, como son en diversas zonas de la compuerta, próximos a los elementos móviles como los pasadores, en diversos puntos próximos a la junta de estanqueidad, etc. Se deberá tener en cuenta de instalar los ánodos en el lugar indicado ya que cada uno de ellos debe haber sido diseñado en función de los metales que debe proteger, si se intercambian las posiciones puede darse el caso de que se produzcan corrosiones excesivas en algún punto.

Mantenimiento de la compuerta

El mantenimiento de la compuerta es uno de los puntos claves de la operativa del dique seco, sin un correcto mantenimiento de ésta, podría deteriorarse hasta el punto de quedar inoperativa provocando el paro por completo del propio dique. Es por ello que se debe prever todas las posibles situaciones que generen un deterioro de la misma e intentar evitarlas en la medida de lo posible y si no, reducir su impacto y generar un programa de sustitución de los elementos afectados. En dicho apartado se irán explicando algunas de las tareas más importantes en lo que se refiere al mantenimiento de la compuerta.

- **Incrustaciones:** uno de los problemas más importantes, que se producen en el mar, son las incrustaciones debidas a los seres vivos que en el mar residen. Dichos seres se van posicionando por el conjunto de la estructura generando en ella una capa, la cual puede ser bastante gruesa, de materia viva que puede ir degradando la integridad estructural de la misma. El principal problema que se plantea, es que la parte externa de la compuerta está constantemente en contacto con el agua y debido a ello el único tratamiento que se puede realizar es a la hora de la construcción de la misma. Cuando la compuerta esté completamente acabada se aplicará una serie de capas de pintura epóxica de alto rendimiento, la cual protegerá el material y posteriormente se aplicará unas capas de pinturas antifouling. La pintura antifouling contiene una serie de aditivos los cuales hacen que los organismos vivos no se adhieran a esta y por lo tanto no provoquen las incrustaciones. En el pasado en dicho sistema se utilizaban pinturas a base de metales pesados, como el plomo, pero desde hace varias décadas se eliminaron este tipo de pinturas debido a su alta contaminación. Además de dicho tratamiento inicial de todos los elementos, periódicamente la zona interior de la compuerta deberá ser revisada para la eliminación de todos aquellos elementos extraños que puedan adherirse a la misma. Para el tratamiento de la parte externa de la compuerta se deberá realizar un tratamiento a mano de desincrustación de las zonas más conflictivas y aquellas que muestren un elevado índice biológico. Para ello se utilizaran buzos especialistas, como dicho servicio tiene un coste elevado se recomienda que dicho proceso se realice como mínimo una vez al año, similar a como sucede en los buques, independientemente de las revisiones del resto de elementos.
- **Corrosión:** posiblemente el problema más importante al realizar estructuras metálicas en ambientes marinos es cómo afrontar la corrosión de los elementos debido a la acción del agua salada. Los materiales metálicos al introducirlos en un medio electrolítico como es el agua salada tienen un efecto de transferencia de electrones con la consiguiente pérdida de material del mismo, esto si no se tiene en cuenta puede llegar a ocasionar graves deficiencias estructurales de la misma. Para evitar dicho problema se deberán colocar ánodos a lo largo de toda la estructura; los ánodos son elementos con un carga eléctrica más negativa por lo que tienden a atraer la carga eléctrica debida a la electrolisis.

En la actualidad existen dos tipos de ánodos, los fijos y los de sacrificio; los fijos son puntos metálicos aislados de la estructura los cuales mediante un sistema eléctrico tienen un cierto potencial y carga eléctrica lo cual hace que la electrolisis se produzca en dichos puntos y no en el material a proteger, es un sistema complejo y que requiere de un adecuado mantenimiento ya que si se produjese una fuga de corriente al material todo este se comportaría como ánodo viéndose comprometida su integridad en un período muy corto de tiempo. Por el contrario los ánodos de sacrificio se colocan anclados a la estructura por la parte en contacto con el agua salada, dichos elementos debido a que tienen una carga más negativa van consumiéndose mediante los correspondientes fenómenos de oxidación.

Lo más usual es utilizar este segundo tipo de ánodos, siendo los materiales más empleados el aluminio, Zinc o Magnesio y aleaciones de dichos 3 elementos. Para la elección de la cantidad de material a colocar, el tipo y su disposición existen una serie de formulas que nos determinan a partir de la superficie total a proteger y la temperatura el valor de dichos parámetros. Además de dichos ánodos se deberán colocar otros en zonas de especial riesgo como pueden ser la zona de los apoyos tanto internos como inferiores externos.

- Revisión de los cojinetes: los cojinetes son los elementos móviles que tienen un factor mayor de sufrir un fallo en su operación y por lo tanto que la compuerta no pueda realizar su funcionamiento correctamente. Los cojinetes que se han elegido para dicho proyecto se basan en un material compuesto el cual no necesita lubricación de aceite para su funcionamiento normal, es por ello que en el mantenimiento se ahorrará el hecho de revisar la lubricación adecuada de los mismos.

Aunque dichos cojinetes tienen un mantenimiento realmente bajo sí que se deberá realizar la revisión periódica de algunos puntos que pueden indicarnos que el cojinete debe cambiarse. El principal problema que puede surgir en este elemento es que se produzca una fractura del mismo, esto puede deberse a que se hay producido incrustaciones en algún punto y al abrir la compuerta debido a su gran momento se ha producido un efecto cizalla produciendo el fallo total del mismo. Dicho problema no debería suceder con las inspecciones periódicas de los mismos y retirada de cuerpos extraños próximos a los mismos.

Otro problema sería la aparición de pequeñas fracturas en el material, aunque se han calculado los cojinetes para una carga superior a la que deban soportar en cualquier situación de trabajo, debido a la fatiga del material pueden aparecer grietas pasados largos períodos de tiempo, en dicho caso se deberá contemplar la necesidad del cambio del cojinete afectado.

- Revisión de los pasadores: los pasadores de los distintos apoyos es otro punto crítico el cual se deberá tener muy en cuenta en el mantenimiento general de la compuerta. Dichos elementos funcionan correctamente debido a que su capa superficial tiene una rugosidad extremadamente pequeña, si en dicha superficie se generan corrosiones excesivas podría haber problemas de esfuerzos torsores en el propio material. Para ello como ya se ha dicho los pasadores estarán realizados de acero inoxidable de alta calidad el cual permitirá soportar los esfuerzos debido a su funcionamiento y a su

vez los ataques en su superficie debido a la corrosión del agua de mar. Otra forma de evitar la corrosión de los mismos es situando próximos a cada pasador un ánodo de sacrificio que desvíe el efecto electrolítico en el acero.

- Revisión de los cables: los cables son uno de los elementos que hay que revisar con mayor cautela, debido a que el fallo de uno de sus elementos puede provocar un fallo en cadena del resto de elementos inutilizando por completo el funcionamiento de la compuerta. Los cables están formados por un conjunto de hilos que forman cordones, dichos cordones están situados de cierta forma respecto de un núcleo central el cual le da consistencia al conjunto.

Uno de los problemas habituales en los cables es que alguno de los cordones se desvíe de su posición original, esto produce que el cable quede dañado y que deba cambiarse en un periodo corto de tiempo. Otra situación problemática debido a su contacto con un medio abrasivo es que el cable se vaya desgastando progresivamente con el tiempo; el fabricante en su hoja de características afirma que están fabricados con materiales que soportan los medios salinos, a pesar de esto se realizarán inspecciones rutinarias del estado de los mismos y si fuera necesario se cambiaran aquellos que no se encuentren en un estado adecuado.

- Motor eléctrico: en esta compuerta se utilizan dos motores eléctricos para elevar la compuerta desde su posición horizontal, los motores deberán ser aptos para su funcionamiento en medios salinos abrasivos y deberán ser adecuados para el emplazamiento que se les asigne. Los motores eléctricos no necesitan de un mantenimiento continuo excesivo y a la hora de comprar un modelo en concreto el fabricante nos indicará cuales son las tareas de mantenimiento más adecuada para el motor en concreto.

Lo más usual son las revisiones de los cojinetes de apoyo cada cierto periodo de tiempo y comprobación que los bornes están en un estado adecuado; el resto de reparaciones vienen dadas por fallos del motor y no por mantenimiento previsto.

- Poleas y reductora: la reductora es el elemento que acopla los motores eléctricos a las poleas, este elemento está formado por un conjunto de engranajes dispuestos de cierta forma que permiten pasar de una velocidad elevada y un par pequeño a una velocidad lenta y un par grande. Al igual que en el caso anterior los fabricantes de reductoras adjuntan con el producto un manual en el cual se indican las tareas de mantenimiento necesarias para cada modelo. Lo más usual es que indiquen que se debe controlar el nivel y cambiar el aceite interno cada cierto periodo de tiempo.

Las poleas son unos elementos metálicos los cuales tienen unas ranuras por dentro de las cuales los cables se situaran, mientras estos sean recogidos en la elevación de la compuerta. Las dos principales tareas de mantenimiento se basan en la revisión de las diferentes cajas para evitar que se sitúe algún elemento que pueda dañar los cables y la comprobación de que el eje de la polea no sufre deformaciones importantes debido a su uso normal.

- Engrase de los rieles: los elementos de apoyo interno están situados en unos rieles los cuales le permiten su pliegue y despliegue cuando la compuerta realiza los distintos

movimientos en su operativa normal. El problema es que aunque existe una holgura suficiente entre ambos elementos y las caras que se encuentran en contacto no tienen una rugosidad superficial elevada, siempre va existir una fricción que impedirá el movimiento totalmente suave del elemento. Debido a esto se colocará en el interior de dicho riel una capa de grasa para usos marinos que vitará un rozamiento excesivo entre los materiales, dicha grasa tiene la característica principal que no es soluble en agua y por lo tanto no fluirá al contacto con esta.

Se deberá hacer un engrase adecuado de dichos elementos pero sin poner una capa excesiva ya que el dicho caso la grasa se desprenderá y por lo tanto quedará en suspensión en el agua.

- Juntas de estanqueidad: el buen mantenimiento de este elemento se hace indispensable si se desea que el dique seco sea completamente estanco. La junta como se explico en el apartado de diseño de la misma está compuesta por dos partes, una interior de un material un poco menos resistente pero bastante rígido y otra exterior con una resistencia elevada y moldeable.

A nivel de mantenimiento la que se deberá tener en cuenta es la junta exterior, ya que será la que sufra un mayor desgaste debido a que está en contacto con el fluido abrasivo. Dicha junta está formada por una lámina de EPDM la cual está sujeta por unas pletinas metálicas que sujetan la misma por los extremos. Este sistema permite sustituir trozos de juntas dañadas sin tener que sustituir la junta de toda la compuerta, además es mucho más económico y ecológico ya que la cantidad de material a sustituir es menor.

Estudio medioambiental

Necesidad de un estudio medioambiental:

En el sistema socio-cultural actual es absolutamente necesario a la hora de realizar cualquier tipo de proyecto tener en cuenta las repercusiones medioambientales que este proyecto puede ocasionar. En el caso de obras civiles, como la que se ha planteado en este proyecto, se ha de tener en cuenta este aspecto de una forma especial ya que pueden influir en hábitats de especies autóctonas de la zona.

En el caso de las obras portuarias, se debe cumplir la Ley de costas 22/1988 del 28 de julio; en el texto sale reglamentado todas las actuaciones necesarias que se deben realizar antes, durante y finalizado el proyecto; y entre estas acciones las oportunas a nivel medioambiental. Dicho estudio medioambiental normalmente es un proyecto realizado por entidades especializadas que evalúan como pueden afectar dichas infraestructuras al hábitat existente.

No solo se evalúa los aspectos puramente biológicos de los organismos existentes, sino que también se estudian los efectos provocados por las estructuras en las corrientes marinas, se han dado casos que por la instalación de rompeolas a cierta distancia de la costa se han producido cambios de significativos en las corrientes que posteriormente han afectado a los seres vivos que allí coexistían.

Estudio medioambiental de la implantación del dique en la ampliación del puerto de Barcelona:

Este apartado se va a centrar en la repercusión ecológica que ha afectado a la zona sur de Barcelona, en concreto al delta del río Llobregat por la construcción de la ampliación del puerto de Barcelona. La información para el estudio ha sido obtenida a partir del estudio realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y de Conservación del Litoral que fue publicado en el BOE.

Los principales impactos producidos por dicha obra son los siguientes:

- El primer impacto, y más importante, es la desviación del río Llobregat; su desembocadura se situará 2,5 km hacia el SSE de la desembocadura actual permitiendo así ampliar la superficie del puerto.

Se creará un nuevo lecho para el río, ya que el actual será absorbido por el puerto. El espacio ganado entre los dos lechos pertenece a una de las zonas húmedas del delta y tiene una gran importancia ecológica y es el primer impacto ambiental evidente, ya que estas zonas desaparecerán.

Las medidas correctoras ha este suceso se basan en la instalación de una nueva depuradora, la más grande de Europa, que revalorizará la zona. Con dicho sistema se

pretende que las aguas que lleguen a la zona del delta sean los más limpias posibles permitiendo una mejora del ecosistema existente. La depuradora asegura que durante su funcionamiento descargará un caudal mínimo al delta del río para evitar las contracorrientes producidas por las mareas.

- El segundo aspecto, es el desplazamiento de las zonas húmedas pertenecientes a los laterales del río. Los humedales actuales desaparecerán debido a que en su situación estará una gran terminal del puerto de Barcelona y parte de la ampliación del ZAL. La nueva situación de los humedales estará en la linde derecha de la desembocadura del río Llobregat.



Nueva zona de humedales.

Se utilizarán los áridos extraídos de la zona de las nuevas terminales para crear una nueva zona de marismas, a su vez se utilizarán arenas de grano grueso para la construcción de un lecho para una posterior playa; que recorrerá lo largo de la zona húmeda, para evitar la entrada masiva de agua salada a dicha zona.

- El tercer aspecto, es la erosión de las playas debido a las mareas y el desvío de la corriente. Como ya se ha comentado el cambio en la orografía submarina puede provocar cambios importantes en las corrientes marítimas, esto es lo que ha sucedido con la ampliación de puerto.

En la zona de Cataluña existe una corriente en dirección Noreste hacia el Sureste, ésta transporta una gran cantidad de arena que va depositando a lo largo de las playas de todo el litoral. Esta reposición natural de arena evita que las playas pierdan su arena debido a las mareas normales en todo el territorio. El problema surge que con la ampliación del puerto, la zona más próxima al delta del río no recibirá la corriente que le reponga la arena perdida. Debido a las corrientes existentes en la zona la arena de dicha zona se irá depositando poco a poco en la zona de Port Ginesta.

Según los análisis realizados por expertos aproximadamente cada 5 años se deberá de hacer un dragado de la zona de Port Ginesta y trasladar dichos áridos a la zona de la

desembocadura del Llobregat; el coste de dicha operación será sufragado por el puerto de Barcelona.

- EL cuarto aspecto importante, es el desplazamiento de especies y la destrucción de hábitats en la zona donde se implantará la ampliación del puerto. La zona donde se realiza la ampliación tiene una importancia vital ya que es una zona donde viven distintas colonias de fauna, algunas de las cuales únicas en toda Cataluña.

Es por ello que antes de realizar el proyecto se estudió de una forma concisa cual sería la mejor forma de desplazar dichas colonias a las nuevas zonas creadas artificialmente. Es por ello que primero se generaron las marismas artificiales para que el desplazamiento de los especímenes se realizase de forma progresiva.

El estudio explica que durante y posteriormente a la finalización del proyecto se realizarán una serie de estudios periódicos dirigidos por el Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña para cerciorarse que el impacto a estas colonias sea el mínimo y que se vaya normalizando su tasa de crecimiento hasta llegar a los límites normales de cada especie.

Impacto medioambiental en la construcción e instalación de la compuerta:

En la construcción de la compuerta se generan una serie de residuos y contaminantes que se deberán tener en cuenta; además se deberá prever qué tipo de materiales se utilizarán para reducir su impacto en el medio ambiente. Es por ello que un primer análisis se realizará a los propios materiales que se utilizarán en la construcción de la compuerta.

- Para la construcción de la propia compuerta el material más importante que se va a utilizar es el acero. El acero es uno de los materiales más utilizados en la industria en general y es por ello que sus características son ampliamente conocidas. El residuo que se pueda generar de dicho material puede ser aprovechado y reintroducido de nuevo en la cadena industrial mediante procesos de fundición, es conocido que aproximadamente el 40% de la producción mundial proviene del reciclado.

Otro residuo a tener en cuenta es el generado por el material de soldadura, en proyectos donde la cantidad de soldadura es abundante se suelen utilizar sistemas robotizados que usan soldaduras tipo MIG o MAG las cuales únicamente desprenden al ambiente el gas ionizante. Pero como no en todos los sitios se puede idear una secuencia computarizada para la soldadura se debe realizar mediante métodos manuales. Estos suelen ser más contaminantes ya que usan electrodos los cuales dejan una cierta cantidad de escoria que posteriormente debe ser retirada.

Otro punto que tendremos en cuenta es el pintado de la compuerta, posiblemente la calidad del mismo marque la vida útil de la misma. La pintura es el elemento que junto a los ánodos de sacrificio evitan que el agua de mar corra la chapa de la compuerta. Se deben utilizar pinturas que no contengan metales pesados ni elementos que puedan contaminar el entorno marino. Con la utilización de las pinturas epóxicas esto

no sucederá ya que tienen una gran durabilidad y no generan problemas de contaminación como ya se ha demostrado ampliamente en el mundo naval.

- A la hora de la construcción de los apoyos tenemos principalmente, como en el caso anterior, acero. Pero además como se tratan de unas bisagras deberán tener una lubricación adecuada, esta vendrá dada por un aceite que limitará la fricción de los elementos. Dicho sistema evita que el agua de mar penetre en los elementos internos y a su vez que el aceite se vierta al mar produciendo un daño en el ecosistema.
- Los elementos de estanqueidad deben tenerse especialmente en cuenta en dicho análisis porque va a ser posiblemente el elemento que sufra un mayor deterioro de la compuerta y por ello se deba sustituir en algunas ocasiones a lo largo de la vida útil de todo el dique.

A la hora de realizar la instalación de la puerta se deberá tener en cuenta si su instalación se va a realizar de forma seca o si por el contrario se hará de forma húmeda. En este caso al tratarse de un dique de nueva construcción ha sido necesaria la construcción de un contradique que permitiera realizar las tareas de cimentación de la cuna del mismo. Es por ello que para el impacto generado para la instalación se tendrá en cuenta dicho método y no su instalación en húmedo sería el método empleado para la sustitución de una ya existente.

- El primer impacto generado en la instalación es el uso de los áridos necesarios para crear el dique de contención. No se puede escoger cualquier tipo de árido, ya que al encontrarse en contacto con el agua salada se debe considerar la posibilidad que su composición afecte de alguna forma a la flora y fauna de la zona. Usualmente para la realización de proyectos similares se crea una capa de roca la cual crea un muro consistente, posteriormente se añaden capas de arena y se compactan en ambas caras del muro. Entre las capas de arena se sitúa una membrana impermeable que ayuda a evitar que se generen pequeñas filtraciones de agua.

Otra opción que se ha utilizado en distintos proyectos de ingeniería civil es la construcción de un cajón metálico que aislase la zona de agua de la zona de trabajo. El problema que surgiría en dicho caso, es que el cajón tendría unas dimensiones excesivamente grandes y sufriría grandes tensiones. A eso se le habría que sumar las posibles fugas generadas entre el cajón y la zona de tierra donde estuviese situado. Por último el coste de dicha estructura aumentaría de forma considerable el coste total del proyecto.

- El segundo impacto en la instalación es los residuos generados por la maquinaria a utilizar tanto en el transporte de la compuerta como en la elevación y colocación de la misma en su emplazamiento final. El impacto ambiental debido al transporte de la compuerta se podría anular completamente si la compuerta se construyese directamente en el dique seco, el producido por la elevación y colocación sería relativamente pequeño ya que se podrían utilizar grúas desde tierra situadas en los extremos del dique o por el contrario grúas de pluma de celosía capaces de cargar más de 700 toneladas.

- El tercer impacto es el más usual en la mayor parte de obras, son todos aquellos materiales que son necesarios para la realización de ciertos trabajos pero que una vez realizado no son útiles en el proyecto y que por lo tanto se deben desechar. Para la reducción de dichos desechos lo más usual es la instalación de contenedores de reciclaje selectivo que permite a los propios trabajadores separar los elementos de desecho.

Impacto medioambiental de la operación del dique:

La realización de dicho estudio perfectamente podría conllevar la realización de un proyecto en sí mismo, es por ello que en este apartado solo se mencionaran aquellos elementos que son más importantes, ya sea por su cantidad o por su impacto al medioambiente.

- Granallado, posiblemente ésta sea una de las acciones que provoca una mayor contaminación en la operación normal del dique. El granallado consiste en la proyección de un material abrasivo (cobre, corindón, silicato de aluminio) que al impactar con el forro del buque hace desprender las capas de pintura para posteriormente aplicar una nueva capa.

Al realizar dicho trabajo, la mayor parte del material proyectado se precipita al suelo una vez realizada su tarea; pero se genera una nube de polvo la cual transporta partículas de pintura y del material proyectado. El material que se precipita a la cuna del dique debe ser recogido ya que si se dejase allí al inundar el dique sería arrastrado por el agua de mar. Aun así, siempre queda una pequeña cantidad de dicha granalla que no se puede recoger y es arrastrada por el agua de mar. Por dicho motivo se intenta que este material sea de un material no contaminante y que se degrade de una forma sencilla con el contacto con el mar.

- Materiales de construcción naval, durante la actividad normal del astillero existen una gran cantidad de trabajos que producen desperdicios de materiales que deben de ser recogidos, segregados y tratados de una forma distinta cada uno. En dicho apartado se comentaran los distintos talleres propios de un astillero y que residuos pueden generar.
 - Taller de Soldadura: Es uno de los talleres que generan una cantidad de residuos más elevados, principalmente debido a la escoria producida por la soldadura. Dicha escoria debe ser recogida y almacenada para un posterior tratamiento ya que suele estar compuesto por materiales con una alto índice de contaminación. Así mismo otro punto a tener en cuenta, es el gas que se desprende a la hora de hacer la soldadura. Dicho gas permite que la soldadura quede uniforme y no penetren sustancias extrañas durante el proceso de la soldadura. La forma ideal para reducir dicha contaminación es la colocación de extractores en la zona de trabajo que filtren el aire extraído.
 - Taller de chapa: El taller de chapa principalmente contamina en su acción de corte, usualmente se utilizan maquinas de corte automática que utilizan un haz plasma a gran temperatura que proyectado contra las láminas de acero

realizan cortes de gran precisión. Otra opción, cuando se trata de astilleros de reparación suele ser el uso del corte por oxiacetilénico, dicho gas alcanza una alta temperatura que funde el metal llegado a una cierta temperatura.

- Taller de electricidad: En dicho taller la cantidad de contaminantes no suele ser muy elevada, además debido a las distintas normativas sobre dichos elementos los aislantes de los cables están compuestos por materiales poco contaminantes. A pesar de esto se debe tener un contenedor específico para el reciclaje de materiales eléctricos y electrónicos.
- Taller de fontanería: En dicho taller se realizan todas las tuberías que sean necesarias para los distintos trabajos del astillero. El principal problema a nivel de residuos que suele haber en dicho taller son las virutas generadas por el corte y manipulación de las distintas tuberías; en algunos casos se generan ciertos retales inservibles, pero no suelen generar una mayor importancia. Dichos residuos al ser, normalmente, metales se intentan mantener separados para un posterior reciclaje de los mismos.
- Taller de pintura: Dicho taller es el encargado de realizar el pintado de todos los elementos que se deban instalar en el buque. Existen dos métodos a la hora de pintar los diferentes elementos:
 - Pintado en cabinas, cuando los elementos no tienen unas medidas exageradamente elevadas, se suelen pintar en cabinas especialmente preparadas que reducen la contaminación al ambiente y que mejoran la calidad del acabado. Dichas cabinas disponen de una serie de filtros que minimizan la emisión de los disolventes propios de la pintura al exterior.
 - Pintado in situ, cuando los elementos son demasiado grandes o debido a su situación no se pueden trasladar a cabinas de pintura, se realiza un pintado en el mismo sitio. Esto genera una mayor cantidad de contaminantes que se liberan al ambiente, es por ello que si es posible se intente utilizar pinturas con niveles de disolventes bajos.

Otro aspecto que deberemos tener en cuenta son las propias pinturas, existen una gran gama de pinturas aplicables en el mundo naval, es por ello que se deberán tener en cuenta los residuos generados por estas para adecuar su posterior tratamiento.

- Recursos energéticos, son uno de los elementos que suponen un mayor impacto aunque no se pueda apreciar de forma visible en los entornos del dique. Un complejo industrial de dicha índole consume una cantidad de recursos energéticos muy abundantes, es por ello que se generan una contaminación de igual magnitud. Es por ello que se debe tener presente el máximo ahorro energético posible siempre y cuando la seguridad en el trabajo se mantenga.

- Posibles contaminantes procedentes de la compuerta, la compuerta se podría considerar en su conjunto como una máquina que realiza un cierto movimiento, para realizar dicha función necesita una serie de elementos que pueden ser susceptibles de contaminar el medioambiente. Los elementos que deberemos tener en cuenta son los siguientes:
 - Sistema de lubricación, la mayor parte de los elementos no necesitan una lubricación específica para su funcionamiento, pero otros deben ser engrasados periódicamente para su funcionamiento, dichas grasas deberán poder absorber por el medio ambiente en un plazo corto de tiempo.
 - Sustitución de los elementos de estanqueidad, si se degradan en exceso tanto la junta superficial como la junta interna se deberá tener en cuenta que dicho material debe de ser reciclado de forma adecuada.

Impacto medioambiental en la retirada de la compuerta:

De la misma forma que se estudian todos los aspectos medioambientales que dependen de la construcción y la operación normal de la compuerta, se debe tener una especial consideración a la hora de realizar el análisis de su retirada. Cuando un elemento deja de ser útil o se vuelve obsoleto, es imprescindible el plantearse la retirada por uno mejor que nos aporte unos mayores beneficios. Dicho requerimiento es clave en cualquier industria actual, ya que muchas veces los beneficios de una empresa pueden variar realizando cambios en la maquinaria de la empresa.

Pero una vez decidido que se va a realizar el cambio se plantea un problema realmente importante, qué hacer con el material a sustituir. En muchos casos dicho material contiene una serie de contaminantes debidos a su normal operación que deben ser eliminados antes de poder reintroducirlos en la cadena de reciclaje. En este apartado se hará un pequeño estudio de los distintos componentes del dique y cuál podría ser su forma más correcta de tratarlos para minimizar el impacto medioambiental.

- La compuerta, como ya se ha comentado es totalmente de acero por lo cual su reciclaje será bastante sencillo, ya que se puede vender como chatarra alguna acería y así extraer un cierto beneficio del producto. Otra opción sería utilizar dicho elemento en algunos de los arrecifes artificiales que se han ido construyendo a lo largo de las costas catalanas. De esta forma se ayudaría a mejorar el ecosistema de la zona, ya que la aportación de elementos metálicos no contaminantes en los entornos marinos produce un aumento de la flora y fauna debido al aporte de nutrientes en la cadena alimenticia.
- Elementos de apoyo, los elementos de apoyo están compuestos básicamente por dos materiales, los elementos estructurales de acero, que al igual que en el caso anterior se podrán reciclar de forma segura. Por el contrario, los cojinetes de material compuesto deberán de ser tratados adecuadamente enviándolos al propio fabricante o a una empresa recuperadora de dichos residuos.

- Los elementos de estanqueidad, como ya se ha visto en su diseño se podrán ir cambiando secciones a lo largo de su vida si se generase un deterioro excesivo por el rozamiento. Como ya se explicó en el capítulo del diseño el material utilizado en dichos elementos será el caucho EPDM; además de sus características técnicas, tiene unas muy buenas características medioambientales ya que no desprende elementos contaminantes. Como opción de reciclaje después de su vida útil cabe la posibilidad de reintroducirlo en el mercado como neumáticos de material reciclado. Es sabido que las grandes empresas como "Firestone" o "Michelin" utilizan parte de goma reciclada para la construcción de nuevos neumáticos para reducir costes y contaminar menos.
- Fluidos de los mecánicos, seguramente esta sea la parte más contaminante de todos los elementos de la compuerta. Los fluidos mecánicos son todos aquellos que se utilizan para reducir el rozamiento entre distintas piezas o impulsar elementos. Como en cualquier industria estos fluidos son grasas y aceites, las cuales por su composición suelen tener un alto índice de contaminación. Existen varios métodos para reciclar los aceites y las grasas ya sean de origen orgánico o sintético; pero el problema es que todos producen una cierta cantidad de contaminantes. Los 4 métodos más importantes de tratar aceites degradados son los siguientes:
 - Destilación, se basa de un proceso físico-químico por el cual al aceite se le añade NaOH y energía esto produce una serie transformaciones de la materia hasta obtener dos sustancias diferenciadas. Por un lado se obtiene MDO (Marine Diesel Oil) con una muy buena calidad, ya que es bajo en cenizas y en contenido de azufre. Es uno de los productos más utilizados en la industria naval debido a que la mayor parte de los buques funcionan con dicho combustible o con Fuel Oil. Por otro lado se obtiene un flux de asfalto que es utilizado para la fabricación pavimentos y recubrimientos de asfaltenos.
 - Combustión, es el método que genera una mayor contaminación pero el que tiene un menor gasto; se trata básicamente de quemar el aceite en grandes industrias de una forma controlada. Se mezcla el aceite con el combustible que se desee quemar, de esta forma el aceite aporta su capacidad calorífica a la combustión. Este método se suele utilizar en grandes hornos de cemento ya que los metales pesados más contaminantes serán absorbidos por los áridos y no se expulsaran a la atmosfera.
 - Regeneración, se trata de la obtención de un nuevo aceite base comercial a partir de los aceites ya usados. En la práctica todos los aceites son regenerables, pero debido a su coste no se suele hacer con aceites con alto contenido de aceites vegetales, aceites sintéticos, agua y sólidos. Dicho proceso es de los más costosos técnicamente, pero es el que aporta un mayor beneficio medioambiental.
 - Destrucción térmica, cuando los aceites contienen sustancias altamente contaminantes la única opción viable es la incineración a altas temperaturas del compuesto, de esta forma se elimina el contaminante sin ser expulsado a la atmosfera.

Conclusiones

En dicho proyecto no se han obtenido unas conclusiones ya que no es un proyecto de investigación, por el contrario se puede decir que se han obtenido una serie de datos e información que conviene remarcar, las cuales han influido de forma bastante importante en el diseño final de la compuerta. A continuación se van a desglosar una serie de puntos que son los más relevantes.

Las dimensiones del dique son unos datos de especial relevancia a la hora de construir la compuerta, hay que tener en cuenta que dos de los tres parámetros determinarán las dimensiones principales de la compuerta. Es por ello que se ha realizado un estudio de los barcos que operan en Barcelona para determinar las dimensiones ideales del mismo, que permitan el mayor rango de actividad dentro de unas dimensiones razonables.

Mediante las dimensiones del dique obtenemos dos de las tres principales, la altura y la manga de la compuerta; el espesor es la tercera y viene dada por los requerimientos estructurales de la misma. En nuestro caso se comenzó con un valor de 2 m de espesor, una vez finalizados los cálculos se observó que el peso de la estructura necesaria para aguantar los esfuerzos era muy inferior al volumen de agua desplazada y esto hacía imposible sumergir la compuerta. Debido a esto se replanteó el espesor de la compuerta a 1 m, con este valor el volumen de agua desplazada se reducía a la mitad y así se logra que el dique se pueda hundir por su propio peso.

Otro factor importante en cuanto a los parámetros iniciales es el posicionamiento de la bisagra inferior respecto al centro geométrico de la compuerta. Si el eje está situado muy hacia afuera, la compuerta se mantendrá cerrada con facilidad pero se necesitará de medios externos para poder abrirla. Por el contrario si se sitúa muy hacia el interior, la compuerta se abrirá con mucha facilidad, pero se necesitara una gran diferencia en las alturas del agua en las caras de la compuerta para que esta se mantenga cerrada.

Para definir la posición del eje se ha realizado un cálculo, el cual definía como condiciones iniciales que el momento generado por la compuerta cuando los niveles de agua en ambas caras eran iguales, debía de ser de sentido hacia el exterior de la compuerta. Teniendo en cuenta esta condición se resolvió el sistema para un conjunto de dimensiones, el resultado final dio que se debía situar el eje a 0,45m desde la cara interna de la compuerta.

Una vez definidos los parámetros iniciales se realizó el cálculo de la compuerta, obtenidos los valores, se efectuó el dimensionado de la misma. El aspecto que cabe destacar en este apartado es el dimensionado de las planchas exteriores, se han dimensionado con un espesor muy superior al necesario para soportar los esfuerzos de la estructura, se ha debido que hacer así por requerimientos de peso de la compuerta. La compuerta debe pesar más que el volumen de agua desplazada, en nuestro caso se definió que dicho valor fuese de un 20% superior al volumen de agua desplazada.

Debido a esta imposición se tuvo que aumentar el espesor de las chapas externas que en un principio se habían definido de 10 mm hasta 30 mm. Posiblemente haya otras alternativas

viabiles a dicho problema, pero en nuestro caso lo hemos abordado de esta forma ya que en su momento se creyó que era el más adecuado.

El problema que surge al dimensionar unas planchas de tal espesor, es que las soldaduras que se deben realizar son extremadamente complejas y que si no se realizan adecuadamente pueden provocar tensiones en las planchas de acero. Por el contrario como las planchas no deben soportar la carga de la compuerta si no que únicamente trabajan a modo de forro de los elementos rigidizadores puede utilizarse dicho método en la construcción de la misma.

Una vez se determinó el conjunto principal de la compuerta se empezaron a realizar los cálculos para los distintos elementos auxiliares de la misma. En este punto nos encontramos uno de los principales problemas del proyecto, los cojinetes de los elementos de apoyo. En un principio se busco la posibilidad de hacerlos de acero, el problema es que al estar sumergidos de forma constante en agua de mar estos se degradarían por la corrosión.

La segunda opción era optar por fabricarlos con un metal que aguantase la corrosión para ello se busco información sobre distintas aleaciones existentes en el mercado, el principal problema, era que aquellas que podían utilizarse no tenían una resistencia adecuada para el funcionamiento requerido. El otro gran problema que surgía con los metales era el como lubricar los elementos que estuvieran en contacto para no provocar un efecto de cizalla. Todos los sistemas planteados vertían una cierta cantidad de los lubricantes al mar, y esto era inviable.

Por último la opción seleccionada se basa en los materiales compuestos; investigando se encontró un material que se utiliza en la industria naval para la fabricación de bocinas el cual permite la fricción del metal con la superficie de este material sin la necesidad de lubricación o lubricándolo con agua. Dicho material se denomina MARITEX y tiene unas excelentes propiedades para la función que se le quiere dar, es por ello que se eligió dicho material para realizar los cojinetes. El principal problema era el poder soportar el peso de la compuerta, y para ello se decidió aumentar el número de apoyos totales en la parte inferior de esta forma los esfuerzos debidos al cortante se reducirían significativamente.

Otro punto realmente significativo es la elección de las juntas; el primer punto importante es su geometría, como se ha explicado en el informe consta de dos juntas independientes una más rígida en la parte interna y otra más resistente en la parte externa; ambas juntas consiguen la estanqueidad gracias a la presión que ejerce la compuerta sobre estas. El segundo punto importante es el material de las mismas, se ha elegido el EMPD que es un tipo de caucho, el cual tiene una gran resistencia a las condiciones adversas a la que trabajará la junta.

El siguiente aspecto a resaltar en los elementos de la compuerta son los cables de elevación, dichos elementos son especialmente importantes ya que son los encargados de realizar la elevación de la misma. Un aspecto importante para la elección de estos elementos ha sido su resistencia a la corrosión en ambientes marinos, para ellos se escogió un tipo de cable, el cual es utilizado en barcos que arrastran elementos por el fondo marino. Estos cables tienen una gran resistencia, además para una mayor seguridad se ha optado por utilizar un conjunto de cables en paralelo, esto nos da un cierto margen de seguridad de que si uno de ellos falla por algún motivo el resto de ellos puede soportar la carga de la compuerta.

Respecto a los motores eléctricos del sistema de elevación es importante que estén pensados para ambientes marinos, a pesar de que estarán situados en una zona de tierra debido a su proximidad con el mar pueden verse afectados por la sal. Es por ello que es conveniente que se tenga en cuenta este hecho con unos grados de protección IP-55 o IP-56; será más que suficiente para dicho trabajo.

Un aspecto que no se ha comentado en el informe, es que cuando los cables hayan levantado completamente la compuerta debe de existir un método de enclavamiento que evite que los motores deban soportar todo el peso de la compuerta. Para ello lo más normal sería el poner un enclavamiento en la polea de los cables la cual bloquearía la misma evitando que el motor tuviese que soportar el par.

Uno de los aspectos más importantes y que tiene que ver con el sistema de elevación es que todo el sistema está pensado para trabajar de forma estática, es decir no sufre velocidades ni aceleraciones. Esto no es del todo cierto ya que como es evidente al subir y bajar la compuerta deberá hacerlo a una cierta velocidad; el método que se ha utilizado para considerar que el sistema es completamente estático se basa en que la velocidad de elevación será muy baja y por lo tanto la compuerta no se considerará como un conjunto dinámico.

Otro tema importante es el de la construcción de la misma, en el proyecto se ha realizado una aproximación de cómo se debería hacer la construcción, posiblemente haya otros métodos más eficientes para la realización de la construcción pero éste se ha basado en los conocimientos adquiridos durante estos años de carrera. Existen dos problemas principales en la construcción, el primero son las soldaduras, como ya se explico en el apartado constructivo hay una gran cantidad de metros de soldadura y algunos de ellos son de extremada dificultad.

El segundo gran problema es el de levantamiento de pesos, la compuerta cuando esté completamente construida tendrá una gran superficie y al elevarla para realizar su colocación estaremos ante una estructura de unos 500m² y más de 500 ton de peso. Este hecho hace que en un diseño real se deba realizar un estudio sobre el levantamiento de la misma y donde colocar todos los puntos de elevación para que la compuerta se comporte de la forma prevista.

Respecto al mantenimiento se ha podido observar que este es muy simple y que no supondrá grandes gastos si se realiza de forma adecuada. Los puntos críticos de todo el proyecto de mantenibilidad son por una parte el correcto mantenimiento de los ánodos de sacrificio, los cuales deberán ser revisados y sustituidos cuando estos sufran una degradación excesiva.

El segundo punto crítico se basa en los cojinetes, ya se ha comentado que están diseñados para trabajar en ambientes salinos y con las cargas de trabajo impuestas, pero existe el problema que puedan depositarse organismos que puedan trabar la compuerta por acumulación de los mismos. Es por ello que a la vez que se realiza la revisión de los ánodos se haga una inspección del estado de los cojinetes.

El último punto a recalcar del proyecto es el estudio medioambiental, se ha realizado un estudio muy básico de la posible incidencia del dique y la compuerta sobre su entorno, en un proyecto real dicho estudio debería ser más profundo y abarcar muchas más áreas de trabajo,

pero debido a la limitación de tiempo y que la finalidad del trabajo no es centrarse en dicho estudio se ha optado por detallar los puntos más importantes del mismo.

Otro aspecto que no se ha evaluado es un presupuesto económico del conjunto, se sabe de la necesidad de que en todo proyecto exista un informe económico que es el que determinará si el proyecto se realiza o no; pero debido a la imposibilidad de cuantificar el valor de muchos de los parámetros se evitó hacer un presupuesto con datos no fiables.

Como conclusión general, la viabilidad de construir un nuevo astillero en la ampliación del puerto de Barcelona es un tema que no puede ser evaluado técnicamente, si no que se necesitaría realizar un estudio económico y de previsión de expansión del comercio en el puerto. A lo que se refiere a la construcción del dique, es un proyecto muy complicado que necesitaría de un gran estudio para la realización del mismo.

En lo que se refiere a la compuerta, como se ha podido comprobar es un proyecto que tiene su dificultad como cualquier proyecto de dicha índole, pero llegado el momento de su verdadero diseño con tiempo y con el personal adecuado es completamente factible la realización del mismo con las características deseadas.

Índice de imágenes

| | |
|--|---------|
| - Imagen 1: Compuerta flotante | Pág. 9 |
| - Imagen 2: Compuerta bisagra lateral | Pág. 10 |
| - Imagen 3: Compuerta bisagra inferior | Pág. 11 |
| - Imagen 4: Esquema de la presión hidrostática en un plancha vertical | Pág. 12 |
| - Imagen 5: Diagrama tensión/deformación | Pág. 14 |
| - Imagen 6: Ampliación del Puerto de Barcelona | Pág. 17 |
| - Imagen 7: Gráfico de la dispersión de los valores de la eslora | Pág. 20 |
| - Imagen 8: Gráfico de la dispersión de los valores de la maga | Pág. 21 |
| - Imagen 9: Gráfico de la dispersión de los valores del calado | Pág. 22 |
| - Imagen 10: Imagen CAD del dique seco | Pág. 22 |
| - Imagen 11: Esquema de a fuerza generada por la presión hidrostática | Pág. 23 |
| - Imagen 12: Esquema de las fuerzas y momentos aplicados a la compuerta | Pág. 24 |
| - Imagen 13: Dinámica de la compuerta | Pág. 28 |
| - Imagen 14: Esquema sección de apoyo de la compuerta | Pág. 30 |
| - Imagen 15: Esfuerzo axil sección de apoyo situado a 4,5m del fondo del dique | Pág. 31 |
| - Imagen 16: Esfuerzo cortante sección de apoyo situado a 4,5m del fondo del dique | Pág. 32 |
| - Imagen 17: Momento flector sección de apoyo situado a 4,5m del fondo del dique | Pág. 33 |
| - Imagen 18: Esquema sección de un extremo de la compuerta | Pág. 34 |
| - Imagen 19: Esfuerzo axil sección situado en el extremo del dique | Pág. 36 |
| - Imagen 20: Esfuerzo cortante sección situado en el extremo del dique | Pág. 37 |
| - Imagen 21: Momento flector sección situado en el extremo del dique | Pág. 38 |
| - Imagen 22: Esquema compuerta completamente abierta | Pág. 38 |
| - Imagen 23: Esfuerzo axil compuerta completamente abierta | Pág. 40 |
| - Imagen 24: Esfuerzo cortante compuerta completamente abierta | Pág. 41 |
| - Imagen 25: Momento flector compuerta completamente abierta | Pág. 42 |
| - Imagen 26: Inercia de la compuerta | Pág. 43 |
| - Imagen 27: Vista superior compuerta | Pág. 44 |
| - Imagen 28: Vista lateral compuerta | Pág. 44 |
| - Imagen 29: Vista CAD elementos rigidizadores | Pág. 44 |
| - Imagen 30: Vista CAD elementos rigidizadores (2) | Pág. 44 |
| - Imagen 31: Imagen geometría de la compuerta | Pág. 45 |
| - Imagen 32: Detalle de los elementos infinitos de la malla | Pág. 46 |
| - Imagen 33: Detalle de los elementos verticales de la malla | Pág. 46 |
| - Imagen 34: Detalle de los elementos horizontales de la malla | Pág. 47 |
| - Imagen 35: Representación de los apoyos inferiores | Pág. 49 |
| - Imagen 36: Representación de los apoyos laterales | Pág. 49 |
| - Imagen 37: Representación de los apoyos interiores | Pág. 50 |
| - Imagen 38: Representación de las cargas aplicadas | Pág. 51 |
| - Imagen 39: Representación del desplazamiento respecto al eje X(m) | Pág. 52 |

| | |
|---|---------|
| - Imagen 40: Representación del desplazamiento respecto al eje y(m) | Pág. 52 |
| - Imagen 41: Representación del desplazamiento respecto al eje Z(m) | Pág. 53 |
| - Imagen 42: Representación del desplazamiento general de la compuerta | Pág. 53 |
| - Imagen 43: Representación de las tensiones respecto del eje X de la compuerta | Pág. 54 |
| - Imagen 44: Detalle de las tensiones respecto al eje X en la zona de los apoyos | Pág. 55 |
| - Imagen 45: Representación de las tensiones respecto del eje Y de la compuerta | Pág. 55 |
| - Imagen 46: Detalle de las tensiones respecto al eje Y en la zona de los apoyos | Pág. 56 |
| - Imagen 47: Representación de las tensiones respecto del eje Z de la compuerta | Pág. 56 |
| - Imagen 48: Detalle de las tensiones respecto al eje Z en la zona de los apoyos | Pág. 57 |
| - Imagen 49: Representación de los momentos respecto del eje Y de la compuerta | Pág. 57 |
| - Imagen 50: Detalle de los momentos respecto del eje Y en la zona de los apoyos | Pág. 58 |
| - Imagen 51: Representación de los momentos respecto del eje Z de la compuerta | Pág. 58 |
| - Imagen 52: Detalle de los momentos respecto el eje Z en la zona de los apoyos | Pág. 59 |
| - Imagen 53: Representación esfuerzo normal máximo | Pág. 60 |
| - Imagen 54: Detalle de los esfuerzos normales en la zona de los apoyos | Pág. 60 |
| - Imagen 55: Representación del momento flector máximo plano XY | Pág. 61 |
| - Imagen 56: Detalle compuesto del momento flector máximo en el plano XY en la zona del apoyo interior con una simulación de la deformación en dicha zona | Pág. 61 |
| - Imagen 57: Representación del momento flector máximo plano XZ | Pág. 62 |
| - Imagen 58: Detalle del momento flector máximo en el plano XZ en la zona del apoyo | Pág. 62 |
| - Imagen 59: Imagen CAD del apoyo interno | Pág. 64 |
| - Imagen 60: Imagen CAD sujeción compuerta apoyo interno | Pág. 66 |
| - Imagen 61: Imagen CAD sujeción viga apoyo interno | Pág. 67 |
| - Imagen 62: Imagen CAD del pasador y cojinetes | Pág. 68 |
| - Imagen 63: Imagen CAD bisagra inferior | Pág. 71 |
| - Imagen 64: Imagen CAD elemento apoyo dique bisagra | Pág. 73 |
| - Imagen 65: Imagen CAD elemento apoyo compuerta bisagra | Pág. 74 |
| - Imagen 66: Imagen CAD pasador, cojinetes y aros de la bisagra | Pág. 76 |
| - Imagen 67: Esquema fuerzas levantamiento compuerta | Pág. 78 |
| - Imagen 68: Esquema dimensiones levantamiento compuerta | Pág. 79 |
| - Imagen 69: Detalle junta estanqueidad | Pág. 84 |
| - Imagen 70: Detalle CAD junta de estanqueidad vertical | Pág. 85 |
| - Imagen 71: Detalle CAD junta de estanqueidad horizontal | Pág. 85 |

| | |
|---|----------|
| - Imagen 72: Detalle CAD junta de estanqueidad esquina inferior | Pág. 86 |
| - Imagen 73: Representación biselado de planchas | Pág. 89 |
| - Imagen 74: Máquina de soldadura continua | Pág. 89 |
| - Imagen 75: Representación situación perfiles | Pág. 90 |
| - Imagen 76: Nueva zona de humedales | Pág. 103 |

Anexos

- Tabla de presiones en función de la velocidad
- Tabla esfuerzos y momentos flectores de sección apoyo situado a 4, 5 m del fondo del dique
- Tabla esfuerzos y momentos flectores de sección apoyo situado en los extremos del dique
- Tabla esfuerzos y momentos flectores de la compuerta completamente abierta
- Tabla representación dimensiones y ángulos dinámica compuerta
- Tabla de datos fuerza tensión en cables al elevar la compuerta
- Tabla de propiedades mecánicas cables

Tabla de presiones en función de la velocidad

| h(m desde sup) | ρ (kg/m ³) | g (m/s ²) | ancho(m) | P (N/m) | Nº perfiles | F perfil (P/m) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|----------------|-------------|-----------------|
| 0 | 1025 | 9,8 | 36 | 0 | 72 | 0,00 |
| 0,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 36162 | 72 | 502,25 |
| 0,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 72324 | 72 | 1004,50 |
| 0,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 108486 | 72 | 1506,75 |
| 0,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 144648 | 72 | 2009,00 |
| 0,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 180810 | 72 | 2511,25 |
| 0,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 216972 | 72 | 3013,50 |
| 0,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 253134 | 72 | 3515,75 |
| 0,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 289296 | 72 | 4018,00 |
| 0,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 325458 | 72 | 4520,25 |
| 1 | 1025 | 9,8 | 36 | 361620 | 72 | 5022,50 |
| 1,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 397782 | 72 | 5524,75 |
| 1,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 433944 | 72 | 6027,00 |
| 1,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 470106 | 72 | 6529,25 |
| 1,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 506268 | 72 | 7031,50 |
| 1,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 542430 | 72 | 7533,75 |
| 1,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 578592 | 72 | 8036,00 |
| 1,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 614754 | 72 | 8538,25 |
| 1,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 650916 | 72 | 9040,50 |
| 1,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 687078 | 72 | 9542,75 |
| 2 | 1025 | 9,8 | 36 | 723240 | 72 | 10045,00 |
| 2,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 759402 | 72 | 10547,25 |
| 2,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 795564 | 72 | 11049,50 |
| 2,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 831726 | 72 | 11551,75 |
| 2,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 867888 | 72 | 12054,00 |
| 2,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 904050 | 72 | 12556,25 |
| 2,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 940212 | 72 | 13058,50 |
| 2,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 976374 | 72 | 13560,75 |
| 2,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 1012536 | 72 | 14063,00 |
| 2,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 1048698 | 72 | 14565,25 |
| 3 | 1025 | 9,8 | 36 | 1084860 | 72 | 15067,50 |
| 3,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 1121022 | 72 | 15569,75 |
| 3,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 1157184 | 72 | 16072,00 |
| 3,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 1193346 | 72 | 16574,25 |
| 3,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 1229508 | 72 | 17076,50 |
| 3,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 1265670 | 72 | 17578,75 |
| 3,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 1301832 | 72 | 18081,00 |
| 3,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 1337994 | 72 | 18583,25 |
| 3,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 1374156 | 72 | 19085,50 |
| 3,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 1410318 | 72 | 19587,75 |
| 4 | 1025 | 9,8 | 36 | 1446480 | 72 | 20090,00 |
| 4,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 1482642 | 72 | 20592,25 |

| h(m desde sup) | ρ (kg/m ³) | g (m/s ²) | ancho(m) | P (N/m) | Nº perfiles | F perfil (P/m) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|----------|---------|-------------|----------------|
| 4,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 1518804 | 72 | 21094,50 |
| 4,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 1554966 | 72 | 21596,75 |
| 4,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 1591128 | 72 | 22099,00 |
| 4,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 1627290 | 72 | 22601,25 |
| 4,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 1663452 | 72 | 23103,50 |
| 4,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 1699614 | 72 | 23605,75 |
| 4,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 1735776 | 72 | 24108,00 |
| 4,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 1771938 | 72 | 24610,25 |
| 5 | 1025 | 9,8 | 36 | 1808100 | 72 | 25112,50 |
| 5,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 1844262 | 72 | 25614,75 |
| 5,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 1880424 | 72 | 26117,00 |
| 5,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 1916586 | 72 | 26619,25 |
| 5,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 1952748 | 72 | 27121,50 |
| 5,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 1988910 | 72 | 27623,75 |
| 5,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 2025072 | 72 | 28126,00 |
| 5,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 2061234 | 72 | 28628,25 |
| 5,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 2097396 | 72 | 29130,50 |
| 5,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 2133558 | 72 | 29632,75 |
| 6 | 1025 | 9,8 | 36 | 2169720 | 72 | 30135,00 |
| 6,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 2205882 | 72 | 30637,25 |
| 6,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 2242044 | 72 | 31139,50 |
| 6,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 2278206 | 72 | 31641,75 |
| 6,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 2314368 | 72 | 32144,00 |
| 6,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 2350530 | 72 | 32646,25 |
| 6,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 2386692 | 72 | 33148,50 |
| 6,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 2422854 | 72 | 33650,75 |
| 6,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 2459016 | 72 | 34153,00 |
| 6,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 2495178 | 72 | 34655,25 |
| 7 | 1025 | 9,8 | 36 | 2531340 | 72 | 35157,50 |
| 7,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 2567502 | 72 | 35659,75 |
| 7,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 2603664 | 72 | 36162,00 |
| 7,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 2639826 | 72 | 36664,25 |
| 7,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 2675988 | 72 | 37166,50 |
| 7,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 2712150 | 72 | 37668,75 |
| 7,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 2748312 | 72 | 38171,00 |
| 7,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 2784474 | 72 | 38673,25 |
| 7,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 2820636 | 72 | 39175,50 |
| 7,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 2856798 | 72 | 39677,75 |
| 8 | 1025 | 9,8 | 36 | 2892960 | 72 | 40180,00 |
| 8,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 2929122 | 72 | 40682,25 |
| 8,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 2965284 | 72 | 41184,50 |
| 8,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 3001446 | 72 | 41686,75 |
| 8,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 3037608 | 72 | 42189,00 |
| 8,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 3073770 | 72 | 42691,25 |
| 8,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 3109932 | 72 | 43193,50 |

| h(m desde sup) | ρ (kg/m ³) | g (m/s ²) | ancho(m) | P (N/m) | Nº perfiles | F perfil (P/m) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------|----------|---------|-------------|----------------|
| 8,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 3146094 | 72 | 43695,75 |
| 8,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 3182256 | 72 | 44198,00 |
| 8,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 3218418 | 72 | 44700,25 |
| 9 | 1025 | 9,8 | 36 | 3254580 | 72 | 45202,50 |
| 9,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 3290742 | 72 | 45704,75 |
| 9,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 3326904 | 72 | 46207,00 |
| 9,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 3363066 | 72 | 46709,25 |
| 9,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 3399228 | 72 | 47211,50 |
| 9,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 3435390 | 72 | 47713,75 |
| 9,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 3471552 | 72 | 48216,00 |
| 9,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 3507714 | 72 | 48718,25 |
| 9,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 3543876 | 72 | 49220,50 |
| 9,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 3580038 | 72 | 49722,75 |
| 10 | 1025 | 9,8 | 36 | 3616200 | 72 | 50225,00 |
| 10,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 3652362 | 72 | 50727,25 |
| 10,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 3688524 | 72 | 51229,50 |
| 10,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 3724686 | 72 | 51731,75 |
| 10,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 3760848 | 72 | 52234,00 |
| 10,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 3797010 | 72 | 52736,25 |
| 10,6 | 1025 | 9,8 | 36 | 3833172 | 72 | 53238,50 |
| 10,7 | 1025 | 9,8 | 36 | 3869334 | 72 | 53740,75 |
| 10,8 | 1025 | 9,8 | 36 | 3905496 | 72 | 54243,00 |
| 10,9 | 1025 | 9,8 | 36 | 3941658 | 72 | 54745,25 |
| 11 | 1025 | 9,8 | 36 | 3977820 | 72 | 55247,50 |
| 11,1 | 1025 | 9,8 | 36 | 4013982 | 72 | 55749,75 |
| 11,2 | 1025 | 9,8 | 36 | 4050144 | 72 | 56252,00 |
| 11,3 | 1025 | 9,8 | 36 | 4086306 | 72 | 56754,25 |
| 11,4 | 1025 | 9,8 | 36 | 4122468 | 72 | 57256,50 |
| 11,5 | 1025 | 9,8 | 36 | 4158630 | 72 | 57758,75 |

Tabla esfuerzos y momentos flectores de sección apoyo situado a 4, 5 m del fondo del dique

| DISTANCIA(m) | AXIL(N) | CORTANTE(N) | MOMENTO(N) |
|--------------|------------|-------------|-------------|
| 0,00 | -417150,51 | 84346,11 | 0,00 |
| 0,25 | -417150,51 | 84346,11 | 21086,53 |
| 0,50 | -417150,51 | 84346,11 | 42173,06 |
| 0,75 | -417150,51 | 84346,11 | 63259,58 |
| 0,75 | -417150,51 | 84346,11 | 63259,58 |
| 1,00 | -420164,01 | 55780,64 | -240599,18 |
| 1,25 | -423177,51 | 27842,99 | -530332,15 |
| 1,50 | -426191,01 | 533,14 | -806253,26 |
| 1,75 | -429204,51 | -26148,89 | -1068676,39 |
| 2,00 | -432218,01 | -52203,11 | -1317915,46 |
| 2,25 | -435231,51 | -77629,51 | -1554284,38 |
| 2,50 | -438245,01 | -102428,11 | -1778097,04 |
| 2,75 | -441258,51 | -126598,89 | -1989667,36 |
| 3,00 | -444272,01 | -150141,86 | -2189309,24 |
| 3,25 | -447285,51 | -173057,01 | -2377336,60 |
| 3,50 | -450299,01 | -195344,36 | -2554063,32 |
| 3,75 | -453312,51 | -217003,89 | -2719803,33 |
| 4,00 | -456326,01 | -238035,61 | -2874870,53 |
| 4,25 | -459339,51 | -258439,51 | -3019578,82 |
| 4,50 | -462353,01 | -278215,61 | -3154242,11 |
| 4,75 | -465366,51 | -297363,89 | -3279174,31 |
| 5,00 | -468380,01 | -315884,36 | -3394689,31 |
| 5,25 | -471393,51 | -333777,01 | -3501101,04 |
| 5,25 | 108486,00 | 246102,50 | -3501101,04 |
| 5,50 | 105472,50 | 228837,66 | -3453753,52 |
| 5,75 | 102459,00 | 212200,63 | -3397930,52 |
| 6,00 | 99445,50 | 196191,41 | -3333945,96 |
| 6,25 | 96432,00 | 180810,00 | -3262113,75 |
| 6,50 | 93418,50 | 166056,41 | -3182747,79 |
| 6,75 | 90405,00 | 151930,63 | -3096161,98 |
| 7,00 | 87391,50 | 138432,66 | -3002670,23 |
| 7,25 | 84378,00 | 125562,50 | -2902586,46 |
| 7,50 | 81364,50 | 113320,16 | -2796224,56 |
| 7,75 | 78351,00 | 101705,63 | -2683898,44 |
| 8,00 | 75337,50 | 90718,91 | -2565922,01 |
| 8,25 | 72324,00 | 80360,00 | -2442609,17 |
| 8,50 | 69310,50 | 70628,91 | -2314273,83 |
| 8,75 | 66297,00 | 61525,63 | -2181229,90 |
| 9,00 | 63283,50 | 53050,16 | -2043791,28 |
| 9,25 | 60270,00 | 45202,50 | -1902271,88 |
| 9,50 | 57256,50 | 37982,66 | -1756985,60 |
| 9,75 | 54243,00 | 31390,63 | -1608246,35 |
| 10,00 | 51229,50 | 25426,41 | -1456368,05 |

| | | | |
|-------|----------|----------|-------------|
| 10,25 | 48216,00 | 20090,00 | -1301664,58 |
| 10,50 | 45202,50 | 15381,41 | -1144449,87 |
| 10,75 | 42189,00 | 11300,63 | -985037,81 |
| 11,00 | 39175,50 | 7847,66 | -823742,32 |
| 11,25 | 36162,00 | 5022,50 | -660877,29 |
| 11,50 | 33148,50 | 2825,16 | -496756,64 |
| 11,75 | 30135,00 | 1255,63 | -331694,27 |
| 12,00 | 27121,50 | 313,91 | -166004,09 |
| 12,25 | 24108,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12,25 | 24108,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12,50 | 21094,50 | 0,00 | 0,00 |
| 12,75 | 18081,00 | 0,00 | 0,00 |
| 13,00 | 15067,50 | 0,00 | 0,00 |
| 13,25 | 12054,00 | 0,00 | 0,00 |
| 13,50 | 9040,50 | 0,00 | 0,00 |
| 13,75 | 6027,00 | 0,00 | 0,00 |
| 14,00 | 3013,50 | 0,00 | 0,00 |
| 14,25 | 0,00 | 0 | 0 |

Tabla esfuerzos y momentos flectores de sección apoyo situado en los extremos del dique

| DISTANCIA(m) | AXIL(N) | CORTANTE(N) | MOMENTO(N) |
|--------------|-----------|-------------|-------------|
| 0,00 | 162729,00 | 176948,83 | 0,00 |
| 0,25 | 162729,00 | 176948,83 | 44237,21 |
| 0,50 | 162729,00 | 176948,83 | 88474,42 |
| 0,75 | 162729,00 | 176948,83 | 132711,62 |
| 0,75 | 162729,00 | 176948,83 | 132711,62 |
| 1,00 | 159715,50 | 161660,86 | -146152,36 |
| 1,25 | 156702,00 | 146855,59 | -407242,67 |
| 1,50 | 153688,50 | 132533,02 | -650933,69 |
| 1,75 | 150675,00 | 118693,16 | -877599,78 |
| 2,00 | 147661,50 | 105335,99 | -1087615,31 |
| 2,25 | 144648,00 | 92461,54 | -1281354,64 |
| 2,50 | 141634,50 | 80069,78 | -1459192,16 |
| 2,75 | 138621,00 | 68160,73 | -1621502,21 |
| 3,00 | 135607,50 | 56734,38 | -1768659,18 |
| 3,25 | 132594,00 | 45790,74 | -1901037,43 |
| 3,50 | 129580,50 | 35329,80 | -2019011,33 |
| 3,75 | 126567,00 | 25351,56 | -2122955,25 |
| 4,00 | 123553,50 | 15856,02 | -2213243,56 |
| 4,25 | 120540,00 | 6843,19 | -2290250,62 |
| 4,50 | 117526,50 | -1686,94 | -2354350,80 |
| 4,75 | 114513,00 | -9734,36 | -2405918,48 |
| 5,00 | 111499,50 | -17299,08 | -2445328,02 |
| 5,25 | 108486,00 | -24381,10 | -2472953,78 |
| 5,25 | 108486,00 | -24381,10 | -2472953,78 |
| 5,50 | 105472,50 | -30980,42 | -2489170,14 |
| 5,75 | 102459,00 | -37097,03 | -2494351,47 |
| 6,00 | 99445,50 | -42730,94 | -2488872,14 |
| 6,25 | 96432,00 | -47882,15 | -2473106,50 |
| 6,50 | 93418,50 | -52550,65 | -2447428,94 |
| 6,75 | 90405,00 | -56736,45 | -2412213,81 |
| 7,00 | 87391,50 | -60439,54 | -2367835,49 |
| 7,25 | 84378,00 | -63659,94 | -2314668,35 |
| 7,50 | 81364,50 | -66397,62 | -2253086,76 |
| 7,75 | 78351,00 | -68652,61 | -2183465,08 |
| 8,00 | 75337,50 | -70424,89 | -2106177,67 |
| 8,25 | 72324,00 | -71714,47 | -2021598,92 |
| 8,50 | 69310,50 | -72521,35 | -1930103,19 |
| 8,75 | 66297,00 | -72845,52 | -1832064,84 |
| 9,00 | 63283,50 | -72686,99 | -1727858,25 |
| 9,25 | 60270,00 | -72045,76 | -1617857,79 |
| 9,50 | 57256,50 | -70921,82 | -1502437,81 |
| 9,75 | 54243,00 | -69315,18 | -1381972,70 |
| 10,00 | 51229,50 | -67225,84 | -1256836,81 |

| | | | |
|-------|----------|-----------|-------------|
| 10,25 | 48216,00 | -64653,79 | -1127404,52 |
| 10,50 | 45202,50 | -61599,04 | -994050,20 |
| 10,75 | 42189,00 | -58061,59 | -857148,21 |
| 11,00 | 39175,50 | -54041,43 | -717072,93 |
| 11,25 | 36162,00 | -49538,57 | -574198,71 |
| 11,50 | 33148,50 | -44553,01 | -428899,94 |
| 11,75 | 30135,00 | -39084,74 | -281550,97 |
| 12,00 | 27121,50 | -33133,77 | -132526,18 |
| 12,25 | 24108,00 | -26700,10 | 17800,07 |
| 12,25 | 24108,00 | -26700,10 | 17800,07 |
| 12,50 | 21094,50 | -20442,26 | 33827,08 |
| 12,75 | 18081,00 | -15018,81 | 42553,28 |
| 13,00 | 15067,50 | -10429,73 | 45021,65 |
| 13,25 | 12054,00 | -6675,02 | 42275,16 |
| 13,50 | 9040,50 | -3754,70 | 35356,77 |
| 13,75 | 6027,00 | -1668,76 | 25309,47 |
| 14,00 | 3013,50 | -417,19 | 13176,22 |
| 14,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tabla esfuerzos y momentos flectores de la compuerta completamente abierta

| DISTANCIA | AXIL AE | CORTANTE | MOMENTO |
|-----------|-----------|------------|------------|
| 0,00 | 541443,75 | 434930,24 | 0,00 |
| 0,25 | 541443,75 | 434930,24 | 108732,56 |
| 0,50 | 541443,75 | 434930,24 | 217465,12 |
| 0,75 | 541443,75 | 434930,24 | 326197,68 |
| 0,75 | 541443,75 | 434930,24 | 434930,24 |
| 1,00 | 541443,75 | 416849,24 | 539142,55 |
| 1,25 | 541443,75 | 398768,24 | 638834,60 |
| 1,50 | 541443,75 | 380687,24 | 734006,41 |
| 1,75 | 541443,75 | 362606,24 | 824657,97 |
| 2,00 | 541443,75 | 344525,24 | 910789,28 |
| 2,25 | 541443,75 | 326444,24 | 992400,34 |
| 2,50 | 541443,75 | 308363,24 | 1069491,15 |
| 2,75 | 541443,75 | 290282,24 | 1142061,71 |
| 3,00 | 541443,75 | 272201,24 | 1210112,02 |
| 3,25 | 541443,75 | 254120,24 | 1273642,08 |
| 3,50 | 541443,75 | 236039,24 | 1332651,89 |
| 3,75 | 541443,75 | 217958,24 | 1387141,45 |
| 4,00 | 541443,75 | 199877,24 | 1437110,75 |
| 4,25 | 541443,75 | 181796,24 | 1482559,81 |
| 4,50 | 541443,75 | 163715,24 | 1523488,62 |
| 4,75 | 541443,75 | 145634,24 | 1559897,18 |
| 5,00 | 541443,75 | 127553,24 | 1591785,49 |
| 5,25 | 541443,75 | 109472,24 | 1619153,55 |
| 5,25 | 541443,75 | 109472,24 | 1619153,55 |
| 5,50 | 541443,75 | 91391,24 | 1642001,36 |
| 5,75 | 541443,75 | 73310,24 | 1660328,92 |
| 6,00 | 541443,75 | 55229,24 | 1674136,23 |
| 6,25 | 541443,75 | 37148,24 | 1683423,29 |
| 6,50 | 541443,75 | 19067,24 | 1688190,10 |
| 6,75 | 541443,75 | 986,24 | 1688436,65 |
| 7,00 | 541443,75 | -17094,76 | 1684162,96 |
| 7,25 | 541443,75 | -35175,76 | 1675369,02 |
| 7,50 | 541443,75 | -53256,76 | 1662054,83 |
| 7,75 | 541443,75 | -71337,76 | 1644220,39 |
| 8,00 | 541443,75 | -89418,76 | 1621865,70 |
| 8,25 | 541443,75 | -107499,76 | 1594990,76 |
| 8,50 | 541443,75 | -125580,76 | 1563595,57 |
| 8,75 | 541443,75 | -143661,76 | 1527680,13 |
| 9,00 | 541443,75 | -161742,76 | 1487244,44 |

| | | | |
|-------|-----------|------------|------------|
| 9,25 | 541443,75 | -179823,76 | 1442288,50 |
| 9,50 | 541443,75 | -197904,76 | 1392812,30 |
| 9,75 | 541443,75 | -215985,76 | 1338815,86 |
| 10,00 | 541443,75 | -234066,76 | 1280299,17 |
| 10,25 | 541443,75 | -252147,76 | 1217262,23 |
| 10,50 | 541443,75 | -270228,76 | 1149705,04 |
| 10,75 | 541443,75 | -288309,76 | 1077627,60 |
| 11,00 | 541443,75 | -306390,76 | 1001029,91 |
| 11,25 | 541443,75 | -324471,76 | 919911,97 |
| 11,50 | 541443,75 | -342552,76 | 834273,78 |
| 11,75 | 541443,75 | -360633,76 | 744115,34 |
| 12,00 | 541443,75 | -378714,76 | 649436,65 |
| 12,25 | 541443,75 | -396795,76 | 550237,70 |
| 12,50 | 541443,75 | -414876,76 | 446518,51 |
| 12,75 | 541443,75 | -432957,76 | 338279,07 |
| 13,00 | 541443,75 | -451038,76 | 225519,38 |
| 13,25 | 541443,75 | -469119,76 | 108239,44 |
| 13,50 | 541443,75 | -487200,76 | -13560,75 |
| 13,50 | 0,00 | 54243,00 | -13560,75 |
| 13,75 | 0,00 | 36162,00 | -4520,25 |
| 14,00 | 0,00 | 18081,00 | 0,00 |
| 14,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tabla representación dimensiones y ángulos dinámica compuerta

| $\alpha(^{\circ})$ | h1 (m) | h2 (m) | b (m) | h2/b | $\beta(^{\circ})$ | $\gamma(^{\circ})$ |
|--------------------|--------|--------|-------|------|-------------------|--------------------|
| 0,00 | 0,00 | 13,75 | 13,75 | 1,00 | 90,00 | 45,00 |
| 1,00 | 0,24 | 13,51 | 13,75 | 0,98 | 89,00 | 44,50 |
| 2,00 | 0,48 | 13,27 | 13,74 | 0,97 | 88,00 | 44,00 |
| 3,00 | 0,72 | 13,03 | 13,73 | 0,95 | 87,00 | 43,50 |
| 4,00 | 0,96 | 12,79 | 13,72 | 0,93 | 86,00 | 43,00 |
| 5,00 | 1,20 | 12,55 | 13,70 | 0,92 | 85,00 | 42,50 |
| 6,00 | 1,44 | 12,31 | 13,67 | 0,90 | 84,00 | 42,00 |
| 7,00 | 1,68 | 12,07 | 13,65 | 0,88 | 83,00 | 41,50 |
| 8,00 | 1,91 | 11,84 | 13,62 | 0,87 | 82,00 | 41,00 |
| 9,00 | 2,15 | 11,60 | 13,58 | 0,85 | 81,00 | 40,50 |
| 10,00 | 2,39 | 11,36 | 13,54 | 0,84 | 80,00 | 40,00 |
| 11,00 | 2,62 | 11,13 | 13,50 | 0,82 | 79,00 | 39,50 |
| 12,00 | 2,86 | 10,89 | 13,45 | 0,81 | 78,00 | 39,00 |
| 13,00 | 3,09 | 10,66 | 13,40 | 0,80 | 77,00 | 38,50 |
| 14,00 | 3,33 | 10,42 | 13,34 | 0,78 | 76,00 | 38,00 |
| 15,00 | 3,56 | 10,19 | 13,28 | 0,77 | 75,00 | 37,50 |
| 16,00 | 3,79 | 9,96 | 13,22 | 0,75 | 74,00 | 37,00 |
| 17,00 | 4,02 | 9,73 | 13,15 | 0,74 | 73,00 | 36,50 |
| 18,00 | 4,25 | 9,50 | 13,08 | 0,73 | 72,00 | 36,00 |
| 19,00 | 4,48 | 9,27 | 13,00 | 0,71 | 71,00 | 35,50 |
| 20,00 | 4,70 | 9,05 | 12,92 | 0,70 | 70,00 | 35,00 |
| 21,00 | 4,93 | 8,82 | 12,84 | 0,69 | 69,00 | 34,50 |
| 22,00 | 5,15 | 8,60 | 12,75 | 0,67 | 68,00 | 34,00 |
| 23,00 | 5,37 | 8,38 | 12,66 | 0,66 | 67,00 | 33,50 |
| 24,00 | 5,59 | 8,16 | 12,56 | 0,65 | 66,00 | 33,00 |
| 25,00 | 5,81 | 7,94 | 12,46 | 0,64 | 65,00 | 32,50 |
| 26,00 | 6,03 | 7,72 | 12,36 | 0,62 | 64,00 | 32,00 |
| 27,00 | 6,24 | 7,51 | 12,25 | 0,61 | 63,00 | 31,50 |
| 28,00 | 6,46 | 7,29 | 12,14 | 0,60 | 62,00 | 31,00 |
| 29,00 | 6,67 | 7,08 | 12,03 | 0,59 | 61,00 | 30,50 |
| 30,00 | 6,88 | 6,88 | 11,91 | 0,58 | 60,00 | 30,00 |
| 31,00 | 7,08 | 6,67 | 11,79 | 0,57 | 59,00 | 29,50 |
| 32,00 | 7,29 | 6,46 | 11,66 | 0,55 | 58,00 | 29,00 |
| 33,00 | 7,49 | 6,26 | 11,53 | 0,54 | 57,00 | 28,50 |
| 34,00 | 7,69 | 6,06 | 11,40 | 0,53 | 56,00 | 28,00 |
| 35,00 | 7,89 | 5,86 | 11,26 | 0,52 | 55,00 | 27,50 |
| 36,00 | 8,08 | 5,67 | 11,12 | 0,51 | 54,00 | 27,00 |
| 37,00 | 8,27 | 5,48 | 10,98 | 0,50 | 53,00 | 26,50 |
| 38,00 | 8,47 | 5,28 | 10,84 | 0,49 | 52,00 | 26,00 |
| 39,00 | 8,65 | 5,10 | 10,69 | 0,48 | 51,00 | 25,50 |
| 40,00 | 8,84 | 4,91 | 10,53 | 0,47 | 50,00 | 25,00 |
| 41,00 | 9,02 | 4,73 | 10,38 | 0,46 | 49,00 | 24,50 |
| 42,00 | 9,20 | 4,55 | 10,22 | 0,45 | 48,00 | 24,00 |
| 43,00 | 9,38 | 4,37 | 10,06 | 0,43 | 47,00 | 23,50 |
| 44,00 | 9,55 | 4,20 | 9,89 | 0,42 | 46,00 | 23,00 |
| 45,00 | 9,72 | 4,03 | 9,72 | 0,41 | 45,00 | 22,50 |
| 46,00 | 9,89 | 3,86 | 9,55 | 0,40 | 44,00 | 22,00 |
| 47,00 | 10,06 | 3,69 | 9,38 | 0,39 | 43,00 | 21,50 |
| 48,00 | 10,22 | 3,53 | 9,20 | 0,38 | 42,00 | 21,00 |
| 49,00 | 10,38 | 3,37 | 9,02 | 0,37 | 41,00 | 20,50 |
| 50,00 | 10,53 | 3,22 | 8,84 | 0,36 | 40,00 | 20,00 |
| 51,00 | 10,69 | 3,06 | 8,65 | 0,35 | 39,00 | 19,50 |
| 52,00 | 10,84 | 2,91 | 8,47 | 0,34 | 38,00 | 19,00 |
| 53,00 | 10,98 | 2,77 | 8,27 | 0,33 | 37,00 | 18,50 |
| 54,00 | 11,12 | 2,63 | 8,08 | 0,32 | 36,00 | 18,00 |
| 55,00 | 11,26 | 2,49 | 7,89 | 0,32 | 35,00 | 17,50 |
| 56,00 | 11,40 | 2,35 | 7,69 | 0,31 | 34,00 | 17,00 |
| 57,00 | 11,53 | 2,22 | 7,49 | 0,30 | 33,00 | 16,50 |
| 58,00 | 11,66 | 2,09 | 7,29 | 0,29 | 32,00 | 16,00 |

| $\alpha(^{\circ})$ | h1 (m) | h2 (m) | b (m) | h2/b | $\beta (^{\circ})$ | $\gamma (^{\circ})$ |
|--------------------|--------|--------|-------|------|--------------------|---------------------|
| 59,00 | 11,79 | 1,96 | 7,08 | 0,28 | 31,00 | 15,50 |
| 60,00 | 11,91 | 1,84 | 6,88 | 0,27 | 30,00 | 15,00 |
| 61,00 | 12,03 | 1,72 | 6,67 | 0,26 | 29,00 | 14,50 |
| 62,00 | 12,14 | 1,61 | 6,46 | 0,25 | 28,00 | 14,00 |
| 63,00 | 12,25 | 1,50 | 6,24 | 0,24 | 27,00 | 13,50 |
| 64,00 | 12,36 | 1,39 | 6,03 | 0,23 | 26,00 | 13,00 |
| 65,00 | 12,46 | 1,29 | 5,81 | 0,22 | 25,00 | 12,50 |
| 66,00 | 12,56 | 1,19 | 5,59 | 0,21 | 24,00 | 12,00 |
| 67,00 | 12,66 | 1,09 | 5,37 | 0,20 | 23,00 | 11,50 |
| 68,00 | 12,75 | 1,00 | 5,15 | 0,19 | 22,00 | 11,00 |
| 69,00 | 12,84 | 0,91 | 4,93 | 0,19 | 21,00 | 10,50 |
| 70,00 | 12,92 | 0,83 | 4,70 | 0,18 | 20,00 | 10,00 |
| 71,00 | 13,00 | 0,75 | 4,48 | 0,17 | 19,00 | 9,50 |
| 72,00 | 13,08 | 0,67 | 4,25 | 0,16 | 18,00 | 9,00 |
| 73,00 | 13,15 | 0,60 | 4,02 | 0,15 | 17,00 | 8,50 |
| 74,00 | 13,22 | 0,53 | 3,79 | 0,14 | 16,00 | 8,00 |
| 75,00 | 13,28 | 0,47 | 3,56 | 0,13 | 15,00 | 7,50 |
| 76,00 | 13,34 | 0,41 | 3,33 | 0,12 | 14,00 | 7,00 |
| 77,00 | 13,40 | 0,35 | 3,09 | 0,11 | 13,00 | 6,50 |
| 78,00 | 13,45 | 0,30 | 2,86 | 0,11 | 12,00 | 6,00 |
| 79,00 | 13,50 | 0,25 | 2,62 | 0,10 | 11,00 | 5,50 |
| 80,00 | 13,54 | 0,21 | 2,39 | 0,09 | 10,00 | 5,00 |
| 81,00 | 13,58 | 0,17 | 2,15 | 0,08 | 9,00 | 4,50 |
| 82,00 | 13,62 | 0,13 | 1,91 | 0,07 | 8,00 | 4,00 |
| 83,00 | 13,65 | 0,10 | 1,68 | 0,06 | 7,00 | 3,50 |
| 84,00 | 13,67 | 0,08 | 1,44 | 0,05 | 6,00 | 3,00 |
| 85,00 | 13,70 | 0,05 | 1,20 | 0,04 | 5,00 | 2,50 |
| 86,00 | 13,72 | 0,03 | 0,96 | 0,03 | 4,00 | 2,00 |
| 87,00 | 13,73 | 0,02 | 0,72 | 0,03 | 3,00 | 1,50 |
| 88,00 | 13,74 | 0,01 | 0,48 | 0,02 | 2,00 | 1,00 |
| 89,00 | 13,75 | 0,00 | 0,24 | 0,01 | 1,00 | 0,50 |
| 90,00 | 13,75 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tabla de datos fuerza tensión en cables al elevar la compuerta

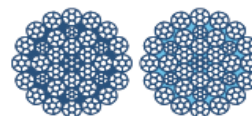
| $\alpha(^{\circ})$ | Peso (N) | F sujeción (N) | Fax (N) | FA y (N) | F sujeción x (N) | F sujeción y (N) |
|--------------------|-----------|----------------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| 0,00 | 976374,00 | 765717,10 | 541443,75 | 434930,24 | 541443,75 | 541443,76 |
| 1,00 | 976374,00 | 759017,26 | 532002,22 | 435004,59 | 532002,22 | 541369,41 |
| 2,00 | 976374,00 | 752281,98 | 522578,96 | 435227,63 | 522578,96 | 541146,37 |
| 3,00 | 976374,00 | 745511,19 | 513176,03 | 435599,28 | 513176,03 | 540774,72 |
| 4,00 | 976374,00 | 738704,89 | 503795,52 | 436119,44 | 503795,52 | 540254,56 |
| 5,00 | 976374,00 | 731863,07 | 494439,52 | 436787,94 | 494439,52 | 539586,06 |
| 6,00 | 976374,00 | 724985,76 | 485110,16 | 437604,58 | 485110,16 | 538769,42 |
| 7,00 | 976374,00 | 718073,01 | 475809,56 | 438569,11 | 475809,56 | 537804,89 |
| 8,00 | 976374,00 | 711124,87 | 466539,89 | 439681,24 | 466539,89 | 536692,76 |
| 9,00 | 976374,00 | 704141,46 | 457303,29 | 440940,63 | 457303,29 | 535433,37 |
| 10,00 | 976374,00 | 697122,87 | 448101,94 | 442346,89 | 448101,94 | 534027,11 |
| 11,00 | 976374,00 | 690069,24 | 438938,01 | 443899,61 | 438938,01 | 532474,39 |
| 12,00 | 976374,00 | 682980,71 | 429813,68 | 445598,29 | 429813,68 | 530775,71 |
| 13,00 | 976374,00 | 675857,46 | 420731,15 | 447442,44 | 420731,15 | 528931,56 |
| 14,00 | 976374,00 | 668699,65 | 411692,61 | 449431,48 | 411692,61 | 526942,52 |
| 15,00 | 976374,00 | 661507,51 | 402700,25 | 451564,81 | 402700,25 | 524809,19 |
| 16,00 | 976374,00 | 654281,23 | 393756,27 | 453841,77 | 393756,27 | 522532,23 |
| 17,00 | 976374,00 | 647021,05 | 384862,86 | 456261,69 | 384862,86 | 520112,31 |
| 18,00 | 976374,00 | 639727,21 | 376022,22 | 458823,81 | 376022,22 | 517550,19 |
| 19,00 | 976374,00 | 632399,98 | 367236,53 | 461527,36 | 367236,53 | 514846,64 |
| 20,00 | 976374,00 | 625039,62 | 358507,99 | 464371,51 | 358507,99 | 512002,49 |
| 21,00 | 976374,00 | 617646,42 | 349838,78 | 467355,41 | 349838,78 | 509018,59 |
| 22,00 | 976374,00 | 610220,67 | 341231,06 | 470478,13 | 341231,06 | 505895,87 |
| 23,00 | 976374,00 | 602762,69 | 332687,02 | 473738,73 | 332687,02 | 502635,27 |
| 24,00 | 976374,00 | 595272,80 | 324208,80 | 477136,22 | 324208,80 | 499237,78 |
| 25,00 | 976374,00 | 587751,33 | 315798,55 | 480669,56 | 315798,55 | 495704,44 |
| 26,00 | 976374,00 | 580198,61 | 307458,42 | 484337,67 | 307458,42 | 492036,33 |
| 27,00 | 976374,00 | 572615,02 | 299190,52 | 488139,43 | 299190,52 | 488234,57 |
| 28,00 | 976374,00 | 565000,90 | 290996,97 | 492073,70 | 290996,97 | 484300,30 |
| 29,00 | 976374,00 | 557356,64 | 282879,87 | 496139,27 | 282879,87 | 480234,73 |
| 30,00 | 976374,00 | 549682,61 | 274841,30 | 500334,89 | 274841,30 | 476039,11 |
| 31,00 | 976374,00 | 541979,21 | 266883,33 | 504659,30 | 266883,33 | 471714,70 |
| 32,00 | 976374,00 | 534246,84 | 259008,01 | 509111,18 | 259008,01 | 467262,82 |
| 33,00 | 976374,00 | 526485,91 | 251217,36 | 513689,17 | 251217,36 | 462684,83 |
| 34,00 | 976374,00 | 518696,84 | 243513,41 | 518391,87 | 243513,41 | 457982,13 |
| 35,00 | 976374,00 | 510880,05 | 235898,15 | 523217,86 | 235898,15 | 453156,14 |
| 36,00 | 976374,00 | 503035,98 | 228373,55 | 528165,66 | 228373,55 | 448208,34 |
| 37,00 | 976374,00 | 495165,07 | 220941,57 | 533233,76 | 220941,57 | 443140,24 |
| 38,00 | 976374,00 | 487267,77 | 213604,13 | 538420,63 | 213604,13 | 437953,37 |
| 39,00 | 976374,00 | 479344,53 | 206363,14 | 543724,68 | 206363,14 | 432649,32 |

| $\alpha(^{\circ})$ | Peso (N) | F sujeción (N) | Fax (N) | FA y (N) | F sujeción x (N) | F sujeción y (N) |
|--------------------|-----------|----------------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| 40,00 | 976374,00 | 471395,82 | 199220,48 | 549144,30 | 199220,48 | 427229,70 |
| 41,00 | 976374,00 | 463422,11 | 192178,01 | 554677,83 | 192178,01 | 421696,17 |
| 42,00 | 976374,00 | 455423,87 | 185237,57 | 560323,59 | 185237,57 | 416050,41 |
| 43,00 | 976374,00 | 447401,59 | 178400,96 | 566079,87 | 178400,96 | 410294,13 |
| 44,00 | 976374,00 | 439355,75 | 171669,97 | 571944,90 | 171669,97 | 404429,10 |
| 45,00 | 976374,00 | 431286,86 | 165046,33 | 577916,90 | 165046,33 | 398457,10 |
| 46,00 | 976374,00 | 423195,41 | 158531,79 | 583994,05 | 158531,79 | 392379,95 |
| 47,00 | 976374,00 | 415081,90 | 152128,02 | 590174,50 | 152128,02 | 386199,50 |
| 48,00 | 976374,00 | 406946,86 | 145836,71 | 596456,37 | 145836,71 | 379917,63 |
| 49,00 | 976374,00 | 398790,80 | 139659,48 | 602837,75 | 139659,48 | 373536,25 |
| 50,00 | 976374,00 | 390614,24 | 133597,94 | 609316,68 | 133597,94 | 367057,32 |
| 51,00 | 976374,00 | 382417,71 | 127653,65 | 615891,20 | 127653,65 | 360482,80 |
| 52,00 | 976374,00 | 374201,74 | 121828,17 | 622559,31 | 121828,17 | 353814,69 |
| 53,00 | 976374,00 | 365966,86 | 116122,99 | 629318,97 | 116122,99 | 347055,03 |
| 54,00 | 976374,00 | 357713,63 | 110539,59 | 636168,12 | 110539,59 | 340205,88 |
| 55,00 | 976374,00 | 349442,59 | 105079,41 | 643104,68 | 105079,41 | 333269,32 |
| 56,00 | 976374,00 | 341154,29 | 99743,86 | 650126,53 | 99743,86 | 326247,47 |
| 57,00 | 976374,00 | 332849,28 | 94534,30 | 657231,54 | 94534,30 | 319142,46 |
| 58,00 | 976374,00 | 324528,13 | 89452,07 | 664417,54 | 89452,07 | 311956,46 |
| 59,00 | 976374,00 | 316191,39 | 84498,47 | 671682,34 | 84498,47 | 304691,66 |
| 60,00 | 976374,00 | 307839,64 | 79674,76 | 679023,74 | 79674,76 | 297350,26 |
| 61,00 | 976374,00 | 299473,45 | 74982,16 | 686439,48 | 74982,16 | 289934,52 |
| 62,00 | 976374,00 | 291093,40 | 70421,86 | 693927,32 | 70421,86 | 282446,68 |
| 63,00 | 976374,00 | 282700,05 | 65995,01 | 701484,98 | 65995,01 | 274889,02 |
| 64,00 | 976374,00 | 274294,00 | 61702,72 | 709110,14 | 61702,72 | 267263,86 |
| 65,00 | 976374,00 | 265875,82 | 57546,06 | 716800,50 | 57546,06 | 259573,50 |
| 66,00 | 976374,00 | 257446,12 | 53526,06 | 724553,69 | 53526,06 | 251820,31 |
| 67,00 | 976374,00 | 249005,48 | 49643,71 | 732367,38 | 49643,71 | 244006,62 |
| 68,00 | 976374,00 | 240554,50 | 45899,96 | 740239,17 | 45899,96 | 236134,83 |
| 69,00 | 976374,00 | 232093,77 | 42295,73 | 748166,66 | 42295,73 | 228207,34 |
| 70,00 | 976374,00 | 223623,90 | 38831,88 | 756147,45 | 38831,88 | 220226,55 |
| 71,00 | 976374,00 | 215145,50 | 35509,25 | 764179,10 | 35509,25 | 212194,90 |
| 72,00 | 976374,00 | 206659,16 | 32328,61 | 772259,16 | 32328,61 | 204114,84 |
| 73,00 | 976374,00 | 198165,51 | 29290,73 | 780385,17 | 29290,73 | 195988,83 |
| 74,00 | 976374,00 | 189665,15 | 26396,29 | 788554,66 | 26396,29 | 187819,34 |
| 75,00 | 976374,00 | 181158,69 | 23645,95 | 796765,14 | 23645,95 | 179608,86 |
| 76,00 | 976374,00 | 172646,77 | 21040,35 | 805014,11 | 21040,35 | 171359,89 |
| 77,00 | 976374,00 | 164130,00 | 18580,04 | 813299,06 | 18580,04 | 163074,94 |
| 78,00 | 976374,00 | 155608,99 | 16265,57 | 821617,45 | 16265,57 | 154756,55 |
| 79,00 | 976374,00 | 147084,38 | 14097,41 | 829966,77 | 14097,41 | 146407,23 |
| 80,00 | 976374,00 | 138556,80 | 12076,02 | 838344,45 | 12076,02 | 138029,55 |
| 81,00 | 976374,00 | 130026,87 | 10201,79 | 846747,96 | 10201,79 | 129626,04 |
| 82,00 | 976374,00 | 121495,22 | 8475,08 | 855174,74 | 8475,08 | 121199,26 |
| 83,00 | 976374,00 | 112962,49 | 6896,19 | 863622,21 | 6896,19 | 112751,79 |
| 84,00 | 976374,00 | 104429,32 | 5465,41 | 872087,80 | 5465,41 | 104286,20 |

| $\alpha(^{\circ})$ | Peso (N) | F sujeción (N) | Fax (N) | FA y (N) | F sujeción x (N) | F sujeción y (N) |
|--------------------|-----------|----------------|---------|-----------|------------------|------------------|
| 85,00 | 976374,00 | 95896,34 | 4182,94 | 880568,94 | 4182,94 | 95805,06 |
| 86,00 | 976374,00 | 87364,19 | 3048,97 | 889063,03 | 3048,97 | 87310,97 |
| 87,00 | 976374,00 | 78833,51 | 2063,62 | 897567,50 | 2063,62 | 78806,50 |
| 88,00 | 976374,00 | 70304,95 | 1226,99 | 906079,76 | 1226,99 | 70294,24 |
| 89,00 | 976374,00 | 61779,15 | 539,12 | 914597,20 | 539,12 | 61776,80 |
| 90,00 | 976374,00 | 53256,76 | 0,00 | 923117,24 | 0,00 | 53256,76 |

Tabla de propiedades mecánicas cables

Endurance **DYFORM**® 34LR & 34LRPI



| Diameter | Approx. nominal length mass | Minimum breaking force (Fmin) | | | | Axial stiffness @20% load | Torque generated @20% load | | Metallic cross section |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------|--------|--------------------|--------|---------------------------|----------------------------|--------|------------------------|
| | | EIPS / 1960 grade | | EEIPS / 2160 grade | | | Ordinary | Lang's | |
| mm | kg/m | kN | tonnes | kN | tonnes | MN | kN.m | kN.m | mm² |
| Dyform 34x7 | | | | | | | | | |
| 10 | 0.51 | 90.0 | 9.17 | 98.1 | 10.0 | 6.0 | 0.001 | 0.003 | 60 |
| 11 | 0.62 | 109 | 11.1 | 118 | 12.0 | 7.2 | 0.002 | 0.004 | 72 |
| 12 | 0.73 | 130 | 13.3 | 140 | 14.3 | 8.6 | 0.002 | 0.006 | 86 |
| 13 | 0.85 | 154 | 15.7 | 166 | 16.9 | 10.1 | 0.003 | 0.007 | 101 |
| 14 | 0.97 | 179 | 18.2 | 191 | 19.5 | 11.7 | 0.004 | 0.009 | 117 |
| 15 | 1.14 | 205 | 20.9 | 220 | 22.4 | 13.5 | 0.005 | 0.011 | 135 |
| 16 | 1.30 | 232 | 23.6 | 251 | 25.6 | 15.3 | 0.006 | 0.013 | 153 |
| 17 | 1.40 | 260 | 26.5 | 284 | 29.0 | 17.3 | 0.007 | 0.016 | 173 |
| 18 | 1.59 | 298 | 30.4 | 319 | 32.5 | 19.4 | 0.009 | 0.019 | 194 |
| 19 | 1.78 | 329 | 33.5 | 356 | 36.3 | 21.6 | 0.010 | 0.023 | 216 |
| 20 | 1.97 | 370 | 37.7 | 397 | 40.5 | 23.9 | 0.012 | 0.027 | 239 |
| 21 | 2.22 | 400 | 40.8 | 432 | 44.0 | 26.4 | 0.013 | 0.030 | 264 |
| 22 | 2.40 | 442 | 45.1 | 482 | 49.1 | 28.9 | 0.016 | 0.035 | 289 |
| 23 | 2.61 | 480 | 48.9 | 525 | 53.5 | 31.6 | 0.018 | 0.040 | 316 |
| 24 | 2.86 | 528 | 53.8 | 569 | 58.0 | 34.4 | 0.020 | 0.046 | 344 |
| 25 | 3.12 | 572 | 58.3 | 620 | 63.2 | 37.4 | 0.023 | 0.051 | 374 |
| 26 | 3.40 | 618 | 63.0 | 658 | 67.1 | 40.4 | 0.026 | 0.058 | 404 |
| 27 | 3.56 | 662 | 67.5 | 718 | 73.2 | 43.6 | 0.029 | 0.064 | 436 |
| 28 | 3.91 | 716 | 73.0 | 784 | 79.9 | 46.9 | 0.032 | 0.072 | 469 |
| 29 | 4.25 | 765 | 78.0 | 829 | 84.5 | 50.3 | 0.035 | 0.080 | 503 |
| 30 | 4.45 | 823 | 83.9 | 900 | 91.7 | 53.8 | 0.040 | 0.089 | 538 |
| 32 | 5.05 | 940 | 95.8 | 1030 | 105.0 | 61.2 | 0.048 | 0.108 | 612 |
| 34 | 5.74 | 1060 | 108 | 1150 | 117 | 69.1 | 0.058 | 0.130 | 691 |
| 35 | 6.02 | 1120 | 114 | 1210 | 123 | 73.3 | 0.063 | 0.141 | 733 |
| 36 | 6.44 | 1180 | 120 | 1280 | 130 | 77.5 | 0.068 | 0.153 | 775 |
| 38 | 7.12 | 1320 | 135 | 1430 | 146 | 86.4 | 0.080 | 0.181 | 864 |
| 40 | 8.07 | 1470 | 150 | 1580 | 161 | 95.7 | 0.094 | 0.212 | 957 |
| Dyform 34x19 | | | | | | | | | |
| 42 | 8.84 | 1620 | 165 | | | 103.5 | 0.245 | 0.381 | 1025 |
| 44 | 9.61 | 1770 | 180 | | | 113.6 | 0.280 | 0.436 | 1125 |
| 46 | 10.6 | 1930 | 197 | | | 124.2 | 0.320 | 0.497 | 1229 |
| 48 | 11.5 | 2120 | 216 | | | 135.2 | 0.366 | 0.570 | 1339 |
| 50 | 12.3 | 2260 | 230 | | | 146.7 | 0.407 | 0.633 | 1453 |
| 52 | 13.6 | 2450 | 250 | | | 158.7 | 0.459 | 0.713 | 1571 |
| 54 | 14.5 | 2750 | 280 | | | 171.1 | 0.535 | 0.832 | 1694 |
| 56 | 15.6 | 2840 | 290 | | | 184.0 | 0.573 | 0.891 | 1822 |
| 58 | 16.8 | 3020 | 308 | | | 197.4 | 0.631 | 0.981 | 1954 |
| 60 | 18.0 | 3200 | 326 | | | 211.3 | 0.691 | 1.075 | 2092 |
| 62 | 19.2 | 3370 | 344 | | | 225.6 | 0.752 | 1.170 | 2233 |
| 64 | 20.5 | 3530 | 360 | | | 240.4 | 0.813 | 1.265 | 2380 |
| 66 | 21.7 | 3840 | 391 | | | 255.6 | 0.912 | 1.419 | 2531 |
| 68 | 23.1 | 4070 | 415 | | | 271.3 | 0.996 | 1.550 | 2687 |

Bibliografía

Libros:

- Vicente Negro Valdecantos. *Diseño de diques verticales*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2001. ISBN 84-380-0182-3.
- Norske Veritas (Organización). *Rules for the construction and classification of floating docks*. Norske Veritas, 1977
- Vicente Esteban Chapapría. *Obras marítimas*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. ISBN: 84-9705-713-9.
- Paulo C.F. Erbisti, *DESIGN OF HYDRAULIC GATES*, San Paulo -2004 - ISBN: 90 5809 621
- Graham W. Owens and Peter R. Knowles. *STEEL DESIGNERS' MANUAL*. U.S.A.-2000 ISBN : 0-632-03877-2
- M.Cervera y E. Blanco. *"Mecánica de Estructuras. Libro 1: Resistencia de Materiales"*. Ed. UPC, Barcelona 2002. ISBN 84-8301-398-3
- M.Cervera y E. Blanco. *"Mecánica de Estructuras. Libro 2: Métodos de Análisis"*. Ed. UPC, Barcelona 2002. ISBN 84-8301-635-4
- M. Vazquez. *"Resistencia de materiales"*. 4ª ed. Ed. Noela, Madrid 1999. ISBN 84-8801-205-5

Páginas web:

- <http://www.kgal.co.uk/index.html> 10/02/2011
- <http://translate.google.es/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Caisson> 13/02/2011
- <http://foros.construaprende.com/disenio-de-compuertas-hidraulicas-vt4496.html> 1/02/2011
- http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Muros.PDF 5/02/2011
- <http://www.areadecalculo.com/index.html> 7/02/2011
- <http://fisica.usach.cl/~lhrodrig/fisica1/hidrostb.pdf> 22/02/2011
- <http://www.portic.net> 22/02/2011
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Pandeo> 22/02/2011
- <http://www.edisonchoa.netfirms.com/pr1.htm> 23/02/2011
- http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_elasticidad 23/02/2011
- http://www.bcn.es/alcalde/es/articles20_3.htm 26/02/2011
- <http://www.juntasgandul.es/index.html> 06/03/2011
- <http://www.hoseco.com/principal.html> 06/03/2011
- <http://www.juntasbesma.com> 09/03/2011
- http://www.manitowoccranes.com/MCG_MC/HOME/SP/BRANDHOME.ASP 09/03/2011
- <http://es.scribd.com/doc/261972/Recuperacion-o-reciclado-de-aceites-usados-de-motor> 12/03/2011
- <http://html.rincondelvago.com/cables-de-acero.html> 05/04/2011

- http://www.rodanol.com/site/index.php?option=com_content&view=article&id=168&Itemid=344 23/04/2011
- http://es.wikipedia.org/wiki/Caucho_etileno_propileno_dieno 11/05/2011
- <http://www.fundicorte.es/catalogo/epdm/> 11/05/2011
- <http://www.directindustry.es/prod/esab/carritos-de-soldadura-automaticos-18224-423137.html> 19/05/2011

Revistas y catálogos:

- Revista de Obras Públicas:
 - Núm. 2561. Art: La construcción del dique seco de Cádiz., 15 noviembre 1930.
 - Núm. 2562. Art: La construcción del dique seco de Cádiz. 1 diciembre 1930.
 - Núm. 2563. Art: La construcción del dique seco de Cádiz. 15 diciembre 1930.
- Catálogo cables BRIDON (www.bridon.com)
- Catálogo SERCABLES, S.A. (www.sercables.com)
- Raupenkran· Crawler Crane LR 1750, LIEBHERR.
- Catálogo material antifricción MARITEX (www.e-cojinetes.com)
- Catálogo propiedades físicas MARITEX (www.e-cojinetes.com)
- Catálogo grasas Industrias Rodanol (www.rodanol.com)

Normativas y documentos estatales:

- Documentos ROM : Reglamentos de obras Marítimas y Portuarias.
 - ROM 0.2-90
 - ROM 2.0-08
- Ley 22/1988, de 28 de julio, de costas. BOE 181.
- Lista oficial de buques españoles 2009.
- Lista oficial de atraques en el puerto de Barcelona Enero del 2011.

Planos del proyecto:

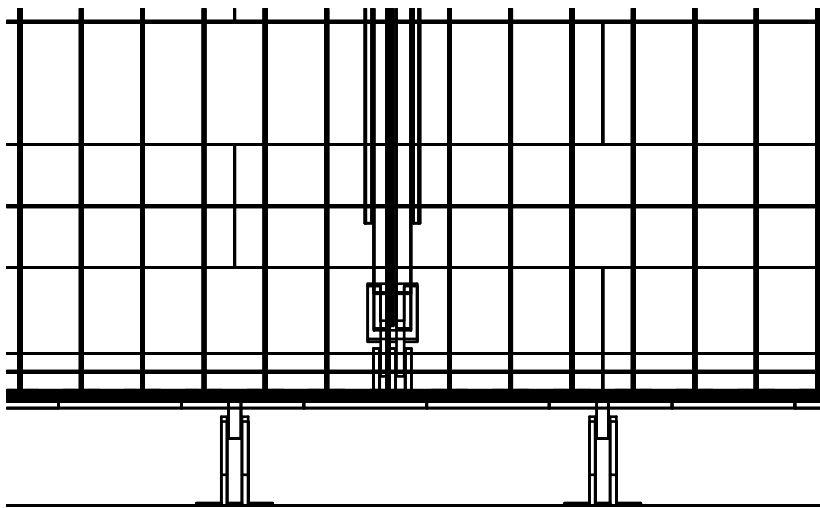
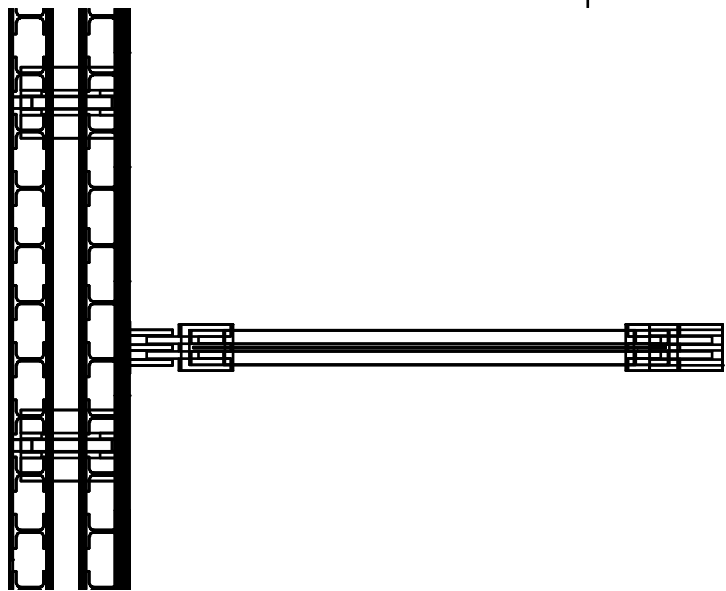
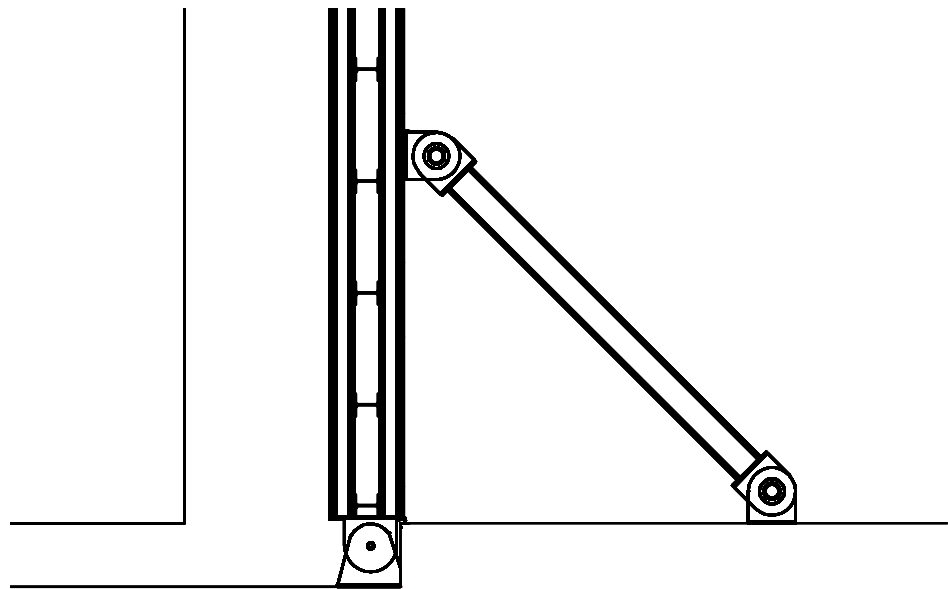
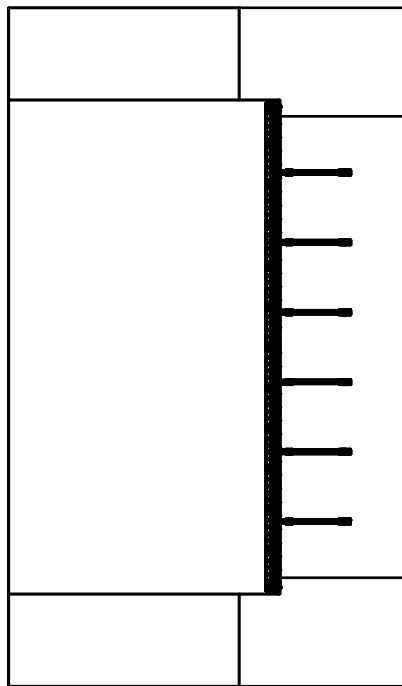
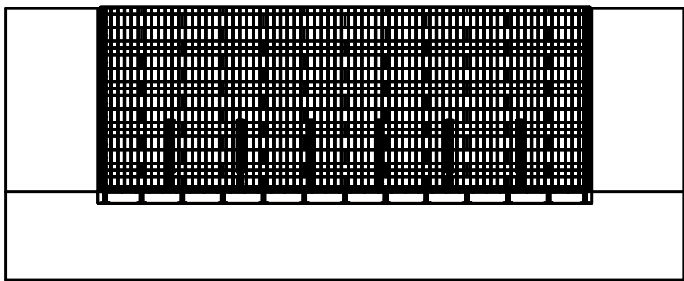
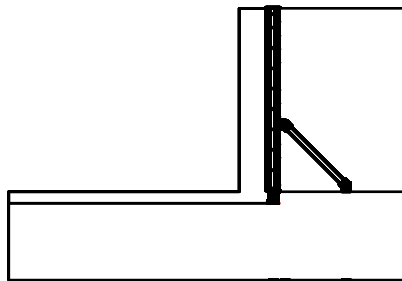
Plano 1: Plano dique completo

Plano 2: Plano compuerta general

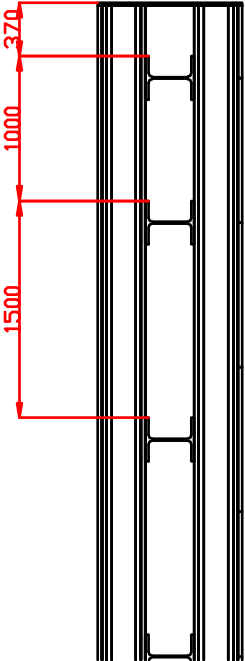
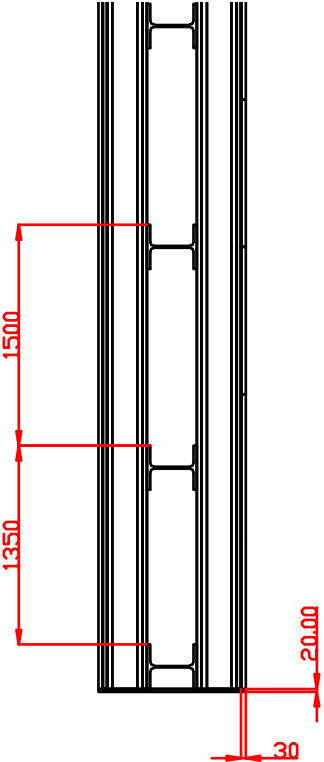
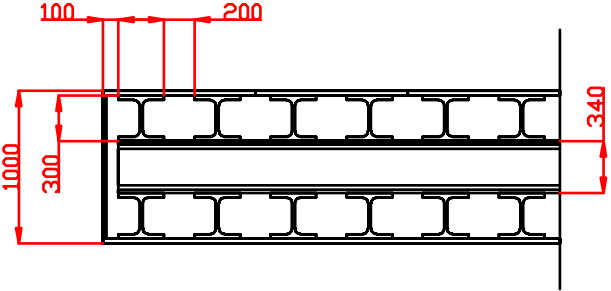
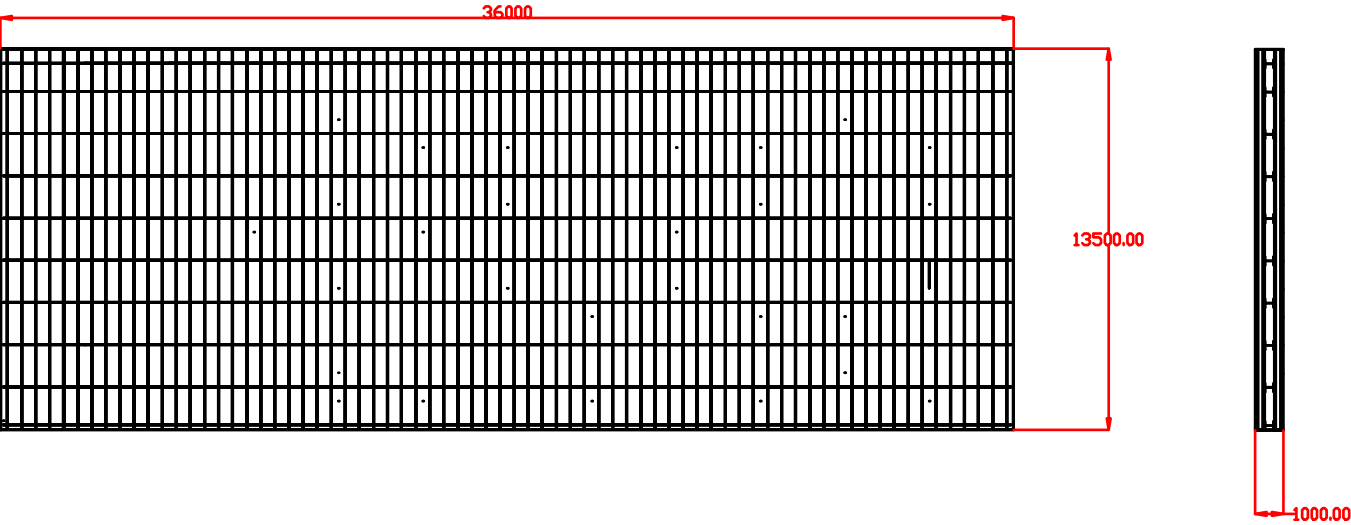
Plano 3: Plano apoyos internos

Plano 4: Plano apoyos inferiores

Plano 5: Plano juntas

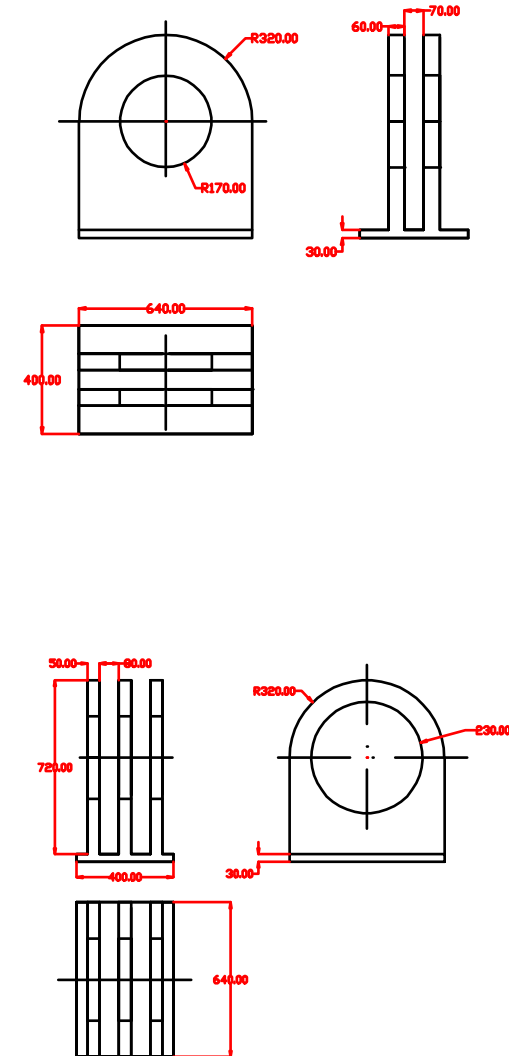
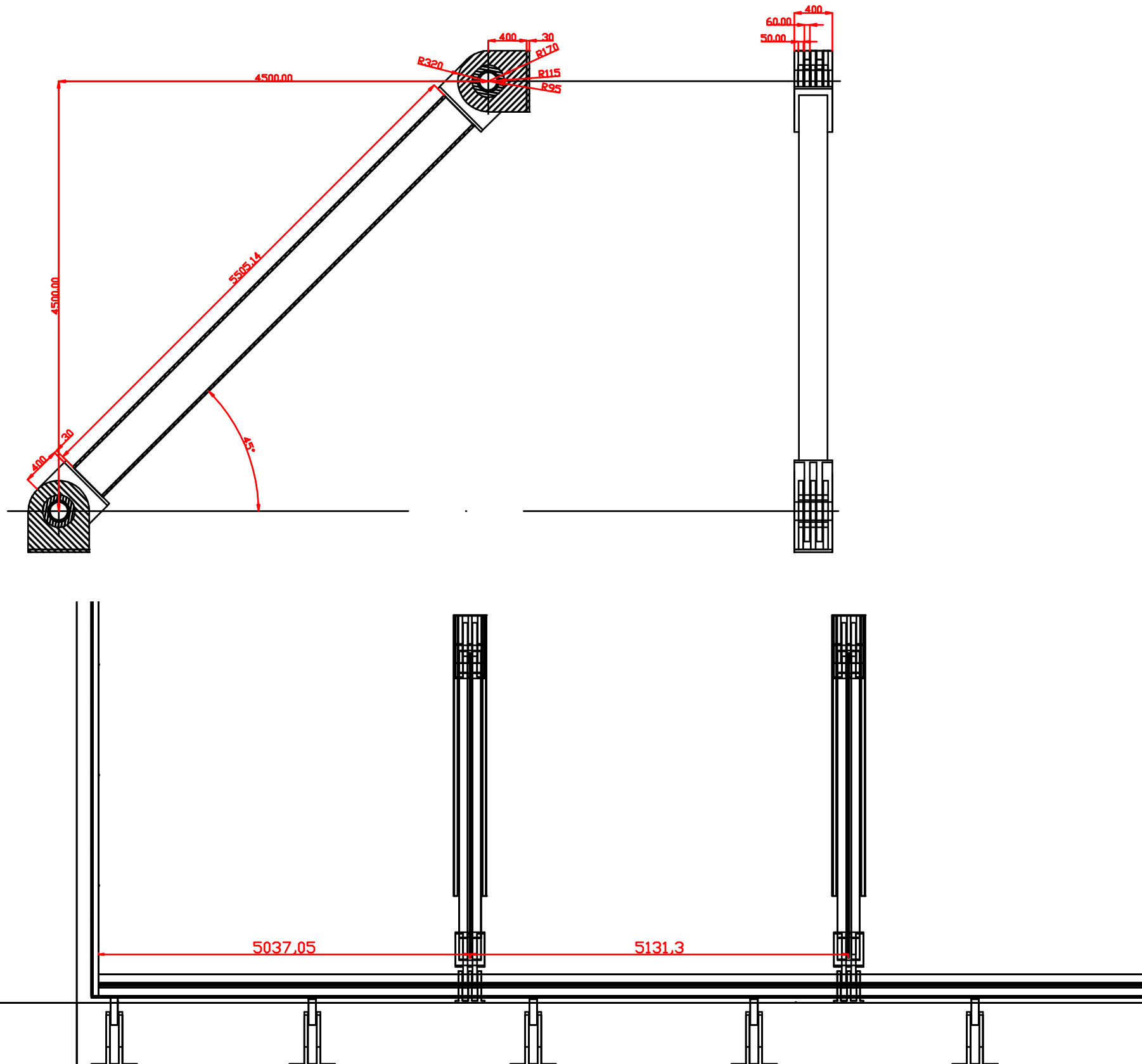


| | | | |
|---|---|---------------------------------|---|
| F N B UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA | DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA COMPUERTA DE BISAGRA INFERIOR PARA UN DIQUE SECO | | |
| | ALUMNO SERGIO CONCEPCIÓN BÁNCHIZ | | PROPIEDAD SERGIO CONCEPCIÓN BÁNCHIZ |
| | SITUACIÓN: C/Carretera 48 1º B | | |
| | PLANO Nº 01 | PLANO DIQUE COMPLETO | PROYECTO BÁSICO Y DE EJECUCIÓN |
| | FECHA: BARCELONA, JUNIO 2011 | | |

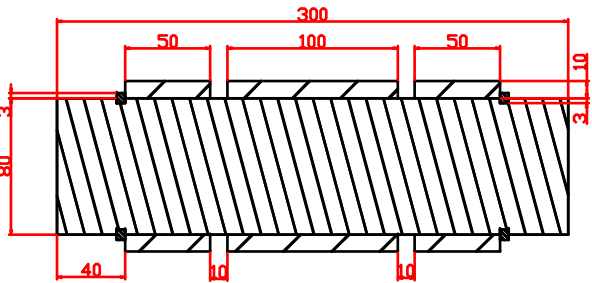
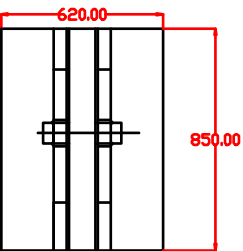
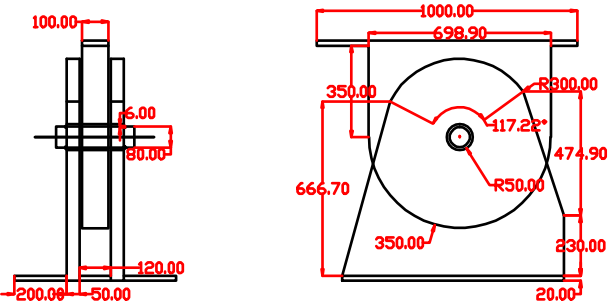
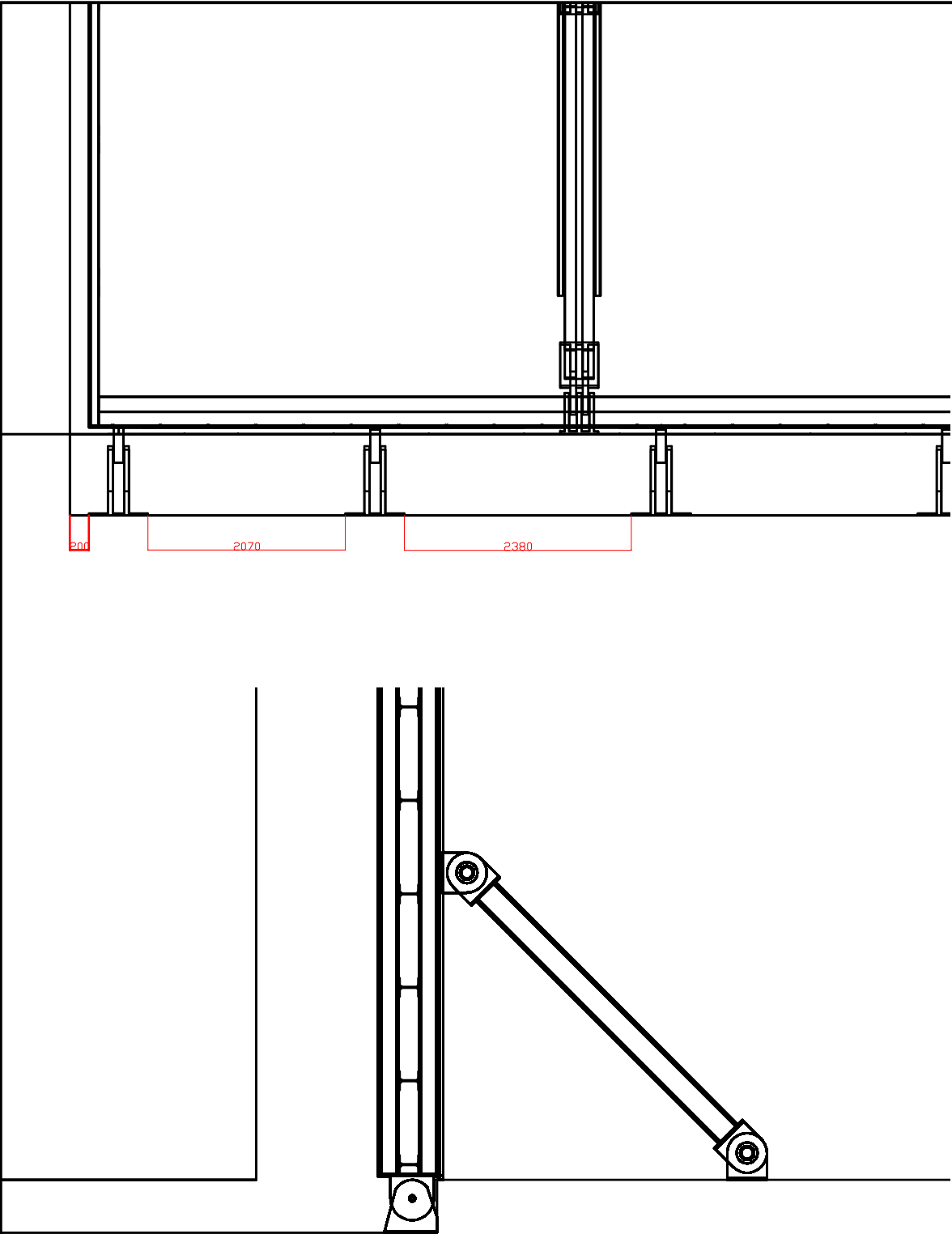


| DATOS COMPUERTA | |
|-----------------------|----------------|
| PERFILES VERTICALES | HEB-300, 13500 |
| PERFILES HORIZONTALES | HEB-350, 35800 |
| PLANCHAS PRINCIPALES | espesor = 30mm |
| PLANCHAS LATERALES | espesor = 20 |

| | | |
|--|---|-----------------------------------|
| F N B UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA | DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA COMPUERTA DE BISAGRA INFERIOR PARA UN DIQUE SECO | |
| | ALUMNO | PROPIEDAD |
| | SERGIO CONCEPCIÓN BÁNCHEZ | SERGIO CONCEPCIÓN BÁNCHEZ |
| | SITUACIÓN: C/Carretera 48 1º B | |
| | PLANO Nº 02 | PROYECTO BÁSICO Y DE EJECUCIÓN |
| FECHA: BARCELONA, JUNIO 2011 | | |



| | | |
|---|--|--|
| F N B UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA | DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA COMPUERTA DE BISAGRA INFERIOR PARA UN DIQUE SECO | |
| | ALUMNO SERGIO CONCEPCIÓN BÁNCHIZ | PROPIEDAD SERGIO CONCEPCIÓN BÁNCHIZ |
| | SITUACIÓN: C/Carretera 48 1º B | |
| | PLANO Nº 03 | PROYECTO BÁSICO Y DE EJECUCIÓN |
| | FECHA: BARCELONA, JUNIO 2011 | |



| | | | |
|---------------------|---|----------------------------|-----------------------------------|
| F N B | DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA COMPUERTA DE BISAGRA INFERIOR PARA UN DIQUE SECO | | |
| | ALUMNO | | PROFESOR |
| | CARRER: INGENIERIA DE OBRAS | | CARRER: INGENIERIA DE OBRAS |
| | SITUACIÓN: OBRAS DE O.T.S. | | |
| | PLANO Nº 04 | PLANO APOYOS INFERIORES | PROYECTO BÁSICO Y DE EJECUCIÓN |
| | FECHA: BARCELONA, JUNIO 2011 | | |

| |
|---|
| UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA |
|---|